

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Vliv obráběcích parametrů na zpevnění povrchové vrstvy při soustružení obrusitelných ucpávek používaných v leteckém průmyslu.

Influence of Turning Operation Parameters on Surface Layer
Hardening of Abradable Seals Used in the Aerospace Industry

Student:

Bc. Michal Valenta

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Valenta**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Specializace: 20 Strojírenská technologie

Téma: **Vliv obráběcích parametrů na zpevnění povrchové vrstvy při soustružení
obrusitelných ucpávek používaných v leteckém průmyslu
Influence of
Turning Operation Parameters on Surface Layer Hardening of Abradable
Seals Used in the Aerospace Industry**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Charakteristika dané problematiky.
3. Návrh experimentálního obrábění a měření.
4. Zpracování naměřených dat a jejich vyhodnocení.
5. Závěr a doporučení.

Seznam doporučené odborné literatury:

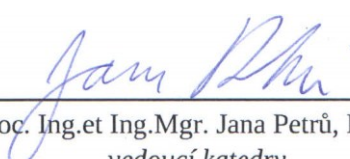
- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno: MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 12.5.2017




Podpis

Prohlašuji, že

- jsem, byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 12.5.2017


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Michal Valenta

Adresa trvalého pobytu autora práce: Babice 62, 78501 Šternberk

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VALENTA, M. *Vliv obráběcích parametrů na zpevnění povrchové vrstvy při soustružení obrušitelných ucpávek používaných v leteckém průmyslu: diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 84 s. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá obráběním žárového nástřiku, který je využíván v leteckém průmyslu jako těsnící povlak. Pro testování byly vybrány tři rozdílné břitové destičky s různým poloměrem zaoblení špičky nástroje. Testovanými vzorky se staly válečky s aplikovaným žárovým nástřikem. Experimentálním soustružením povlaku se otestovaly navržené řezné parametry. V průběhu soustružení byly měřeny složky řezných sil pro každou vyměnitelnou břitovou destičku a pro každý navržený testovací řezný parametr pomocí dynamometru Kistler. Před a po soustružení nástřiku byla měřena tvrdost metodou HR15Y. Po obrobení byla změřena drsnost nástřiku bezdotykovou optickou metodou. Na závěr bylo provedeno statistické zpracování a vyhodnocení naměřených hodnot.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

VALENTA, M. *Influence of Turning Operation Parameters on Surface Layer Hardening of Abradable Seals Used in the Aerospace Industry.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly and Engineering Metrology, 2016, 84 p. Thesis head: Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

This master thesis deals with machining of a thermal spray coating which is used in the aerospace industry as a sealing coating. Three types of cutting blades with different radii of the tool tip were chosen for the testing. Cylinders with applied coating were used as test samples. Proposed machining parameters were tested by experimental turning operations performed on the coating. Constituents of cutting forces were measured during the machining trials for each cutting blade type and also for each proposed cutting parameter using Kistler dynamometer. HR15Y hardness was determined before and after machining of the coating. Change of the surface roughness after the machining step was measured by an optical contactless method. Measured data figures were statistically processed and evaluated in the final stage of the project.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	7
Úvod.....	9
1. Teorie žárových nástřiků	10
1.1 Princip žárových nástřiků	10
1.2 Typy žárových nástřiků.....	12
1.3 Zdroje tepelné energie	16
1.4 Metody žárových nástřiků.....	16
1.5 Porovnání metod žárového nástřiku	21
1.6 Zařízení pro termální nástřik	22
2. Teorie obrábění	23
2.1 Silové vztahy procesu řezání	23
2.2 Fyzikální základy procesu řezání	26
2.3 Obrábění žárového nástřiku	32
3. Měřicí metody.....	34
3.1 Měření tvrdosti povrchu.....	34
3.2 Měření drsnosti povrchu.....	37
4. Experimentální část práce	39
4.1 Použité žárově stříkané povlaky	39
4.2 Použité zařízení, přípravky a vzorky.....	42
4.3 Použité rezné nástroje	48
4.4 Volba rezných podmínek.....	51
4.5 Měření tvrdosti nástřiku před obrobením	51
4.6 Obrábění žárového nástřiku	53
4.7 Měření tvrdosti nástřiku po obrobení	73
4.8 Vyhodnocení zpevnění povrchové vrstvy	74
Závěr	79
Literatura	82

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Popis	Jednotka
APS	Air plasma spraying (nástřík v prostém prostředí)	[-]
C_F	Konstanta, vyjadřující převážně vliv obráběného materiálu	[-]
F	Celková řezná síla	[N]
F_c	Řezná složka síly řezání	[N]
F_f	Posuvová složka síly řezání	[N]
F_p	Pasivní složka síly řezání	[N]
F_x	Velikost složky řezné síly v ose x	[N]
F_y	Velikost složky řezné síly v ose y	[N]
F_z	Velikost složky řezné síly v ose z	[N]
HRA	Tvrdost dle Rockwella (kužel)	[-]
HRB	Tvrdost dle Rockwella (kulička)	[-]
HRC	Tvrdost dle Rockwella (kužel)	[-]
HVOF	High velocity oxy-fuel coating spraying (Vysokorychlostní nástřík plamenem)	[-]
L	Délka	[mm]
LPPS	Low pressure plasma spraying (nástřík za sníženého tlaku)	[-]
RFPS	Radio-freQUENCY plasma spraying (radiofrekvenční nástřík)	[-]
S	Průřez třísky	[mm ²]
TBC	Thermal barrier coating (ochranný tepelný povlak)	[-]
TWAS	Twin wire arc spraying (twin wire nástřík)	[-]

U	Rozšířená nejistota	[~]
VPS	Vakuum plasma spraying (nástřík v uzavřené atmosféře)	[-]
a_p	Hloubka řezu	[mm]
c_F	Materiálová konstanta	[-]
f	Posuv	[mm]
h_{Dmin}	Minimální hodnota jmenovité tloušťky řezu	[mm]
k_U	Koeficient rozšíření	[-]
n	Počet měření	[-]
p	Měrný řezný odpor	[MPa]
r_n	Poloměr zaoblení ostří	[mm]
$s(x)$	Výběrová směrodatná odchylka	[~]
u_A	Standartní nejistota typu A	[~]
v_c	Řezná rychlost	[$m \cdot min^{-1}$]
v_t	Rychlost odchodu třísky	[$m \cdot min^{-1}$]
x_F	Exponent ovlivňující šířku záběru a_p	[-]
y_F	Exponent ovlivňující posuv f	[-]
β_0	Úhel břitu v rovině ortogonální	[°]
β_{0n}	Ortogonální úhel břitu	[°]
δ	Nástrojový úhel řezu	[°]
δ_{OB}	Nástrojový ortogonální úhel řezu	[°]
\bar{x}	Výběrový průměr naměřených hodnot	[~]
λ_s	Nástrojový úhel sklonu hlavního ostří	[°]

Úvod

Tato diplomová práce byla řešena ve spolupráci s firmou Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. (dále jen „Honeywell“). Honeywell je strojírenská společnost se sídlem v Hlubočkách – Mariánské Údolí u Olomouce, jenž je významným dodavatelem částí leteckých motorů a služeb, patřící pod nadnárodní společnost Honeywell International, Inc., hlavním sídlem v Morris Town, New Jersey, USA. Hlavním artiklem společnosti Honeywell je výroba a generální opravy nerotačních částí leteckých turbínových motorů ze speciálních korozivzdorných ocelí, niklových, titanových, hliníkových a kobaltových slitin.

Obsahem diplomové práce je obrábění žárového nástřiku v podmínkách letecké výroby. V práci je popsána technologie žárových nástřiků – princip, typy, metody a porovnání metod žárových nástřiků, zdroje tepelné energie a zařízení pro žárový nástřik. Dále byla popsána problematika teorie obrábění – silové vztahy procesu řezání, fyzikální základy procesu řezání a geometrie bříty. Proběhlo obrábění, měření tvrdosti a drsnosti žárového nástřiku, který se využívá v letecké výrobě.

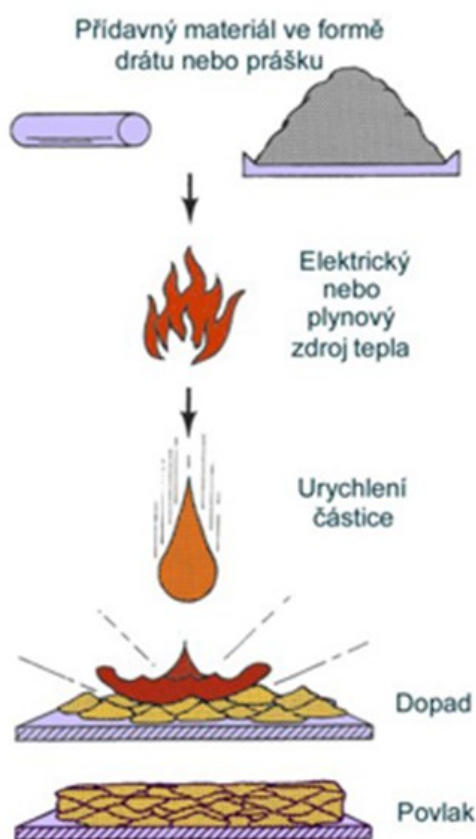
Žárový nástřik je technologie s velkým potenciálem, jenž vytváří efektivně funkční povlak o tloušťce okolo 50 μm , a využívá se v mnoha odvětvích průmyslu. Žárové nástřiky jsou vhodné pro mnoho použití a umožňují přizpůsobit povrch provozním podmínkám. To vede ke zvýšení spolehlivosti, bezpečnosti součásti, prodloužení životnosti a lepší ekonomice daného procesu. [1]

Cílem diplomové práce je zjistit, zda po obrábění žárového nástřiku vzniká povrchové vrstvě nástřiku zpevnění, či nikoli. Testování proběhlo na testovacích válečcích, na které byl nanesen žárový nástřik pomocí atmosférického plazmového nanášení. Na vzorcích byla změřena tvrdost nástřiku pomocí tvrdoměru LECO před a po obrobení. Samotný proces obrábění žárového nástřiku byl realizován pomocí navržených nástrojů za předem stanovených řezných podmínek. V průběhu obrábění byly měřeny řezné síly pomocí dynamometru od společnosti Kistler. Drsnost povrchu byla měřena po obrobení žárového nástřiku na zařízení Alicona - Infinite Focus G5. Výsledky byly zpracovány a statisticky vyhodnoceny.

1. Teorie žárových nástřiků

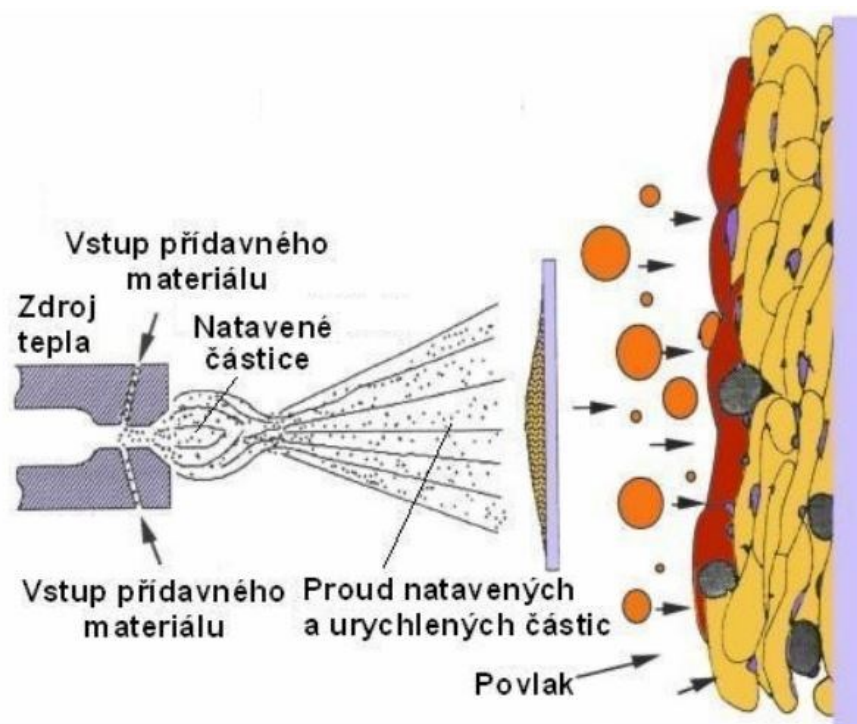
1.1 Princip žárových nástřiků

Žárový nástřik je částicový proces pro tvorbu povlaků o tloušťce okolo 50 μm . Nanášený materiál je ve formě prášku nebo drátu dopravován do zařízení (hořáku), kde dojde k jeho natavení a zrychlení směrem k nanášené součásti. Po dopadu roztavené nebo částečně natavené částice na nanášenou součást dojde k výraznému plošnému rozprostření částice a k rychlému utuhnutí. Tímto se částice na sebe vrství a vytváří povlak se specifickými vlastnostmi a charakteristickou lamelární strukturou. K natavení přídatného materiálu je zapotřebí zdroj tepelné energie a to buď spalovací proces, nebo elektrická energie. [1]



Obr. 1.1 Princip vytváření žárových nástřiků [2]

Žárový nástřik lze vytvářet z druhů keramik, kovů a jejich slitin, u kterých nedochází k rozpadu pod bodem tání, na většinu dostupných materiálů substrátu. Nástřik zakotví k substrátu pomocí mechanického zakotvení na předem zdrsňeném povrchu (např. otryskáváním různými typy médií). Největší vliv na kvalitu žárového nástřiku mají procesní parametry např. tvar a velikost prášku, tepelné vlastnosti prášku, průtok a rychlost nosného plynu, geometrie vstupního kanálu, kinetické energie částice, úhel dopadu, typ substrátu, průtok plynu, teplota, chlazení a trajektorie částic. Díky malé teplotě dopadajících částic je teplota dílce hluboko pod teplotou fázově-strukturálních přeměn a dosahuje až 150 $^{\circ}\text{C}$, tudíž nedochází k deformaci dílce vlivem teploty. [1]

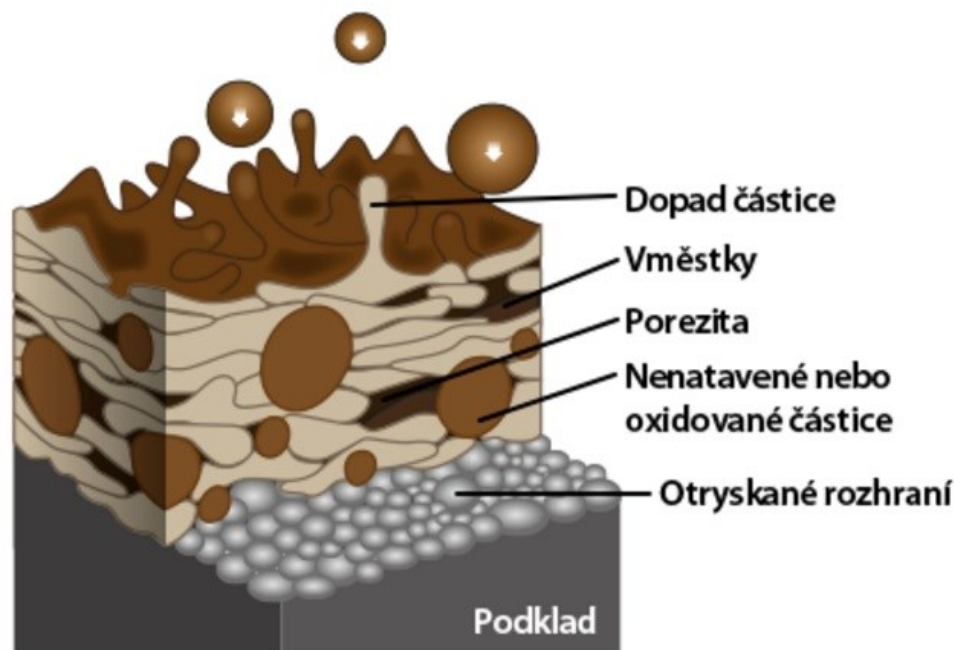


Obr. 1.2 Schéma procesu žárových nástřiků

Výsledkem působení rychlosti plamene je rychlost letících částic a i doba setrvání v plamenu. Čím vyšší je rychlost plamene, tím vyšší je rychlost letící částice, která má vyšší kinetickou energii při dopadu na základní materiál, což zapříčiní větší plastickou deformaci natavené částice, lepší zakotvení a vyšší hustotu nástřiku. Naopak pokud je částice kratší dobu v plamenu může zapříčinit větší množství nenatavených nebo částečně natavených částic ve struktuře nástřiku, taktéž může způsobit nižší hustotu nástřiku. Výhoda nižší teploty částice spočívá v menší rychlosti oxidace a dekarbonizace. Přímo ovlivňující parametry procesu žárového nástřiku jsou rychlost a teplota částic, které ovlivňují výši pórovitosti povlaku, velikost nespojení se základním materiálem a výskyt nenatavených či zoxidovaných částic ve struktuře. [1]

Struktura žárového nástřiku

Struktura žárového nástřiku je lamelárně tvořená jednotlivými deformovanými částicemi tzv. splaty, částečně natavenými nebo nenatavenými částicemi, póry a zoxidovanými částicemi. [1]



Obr. 1.3 Schéma struktury žárového nástřiku [2]

Značná rychlost ochlazování částice po dopadu na základní materiál vede ke krystalizaci velmi jemných zrn a zabraňuje segregaci rovnovážných fází. Mimo oxidů vznikajících na povrchu letící částice během letu k základnímu materiálu, je rozprostření prvků ve struktuře povlaku velmi homogenní a odpovídá rozložení v původním materiálu. [1]

1.2 Typy žárových nástřiků

Nejčastěji využívané žárově stříkané povlaky v leteckém průmyslu jsou povlaky tepelných bariér (TBC – Thermal Barrier Coating), povlaky proti opotřebení a ohrusitelné těsnící povlaky (abradable coating). Pro jednotlivé povlaky existuje typická aplikace a technologie nanášení.

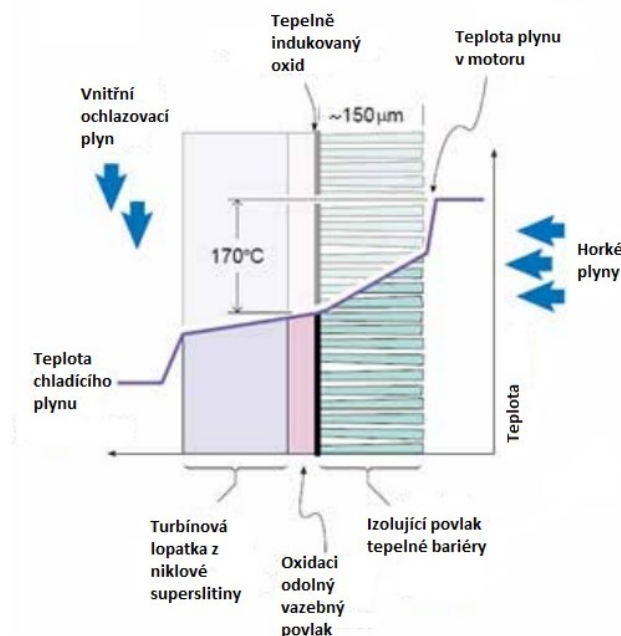
Tepelné bariéry (TBC – Thermal barrier coating)

Termální bariéry jsou nejběžněji využívaným žárovým nástřikem, které nachází uplatnění nejen v leteckém průmyslu. Tepelné bariéry využívají kombinaci alespoň dvou na sebe nanesených povlaků. Horní (funkční) povlak je tvořen keramikou, která je nejčastěji na bázi $\text{ZrO}_2 + 6-8\text{hm.}\% \text{Y}_2\text{O}_3$ o značně nízké tepelné vodivosti a roztažnosti, kterou lze ovlivňovat nejen chemickým složením v podobě tzv. dopantů, ale i technologiemi přípravy přídatného materiálu, či technologiemi přípravy výsledného povlaku. Funkcí keramického povlaku je absorbovat značné množství tepla procházejícího z okolního prostředí a redukovat teplotu na povrchu vazebného povlaku. Obvykle tedy při tloušťce vrchního povlaku $\sim 150-200\mu\text{m}$ dochází ve směru z okolního prostředí k poklesu teploty až o 250°C .

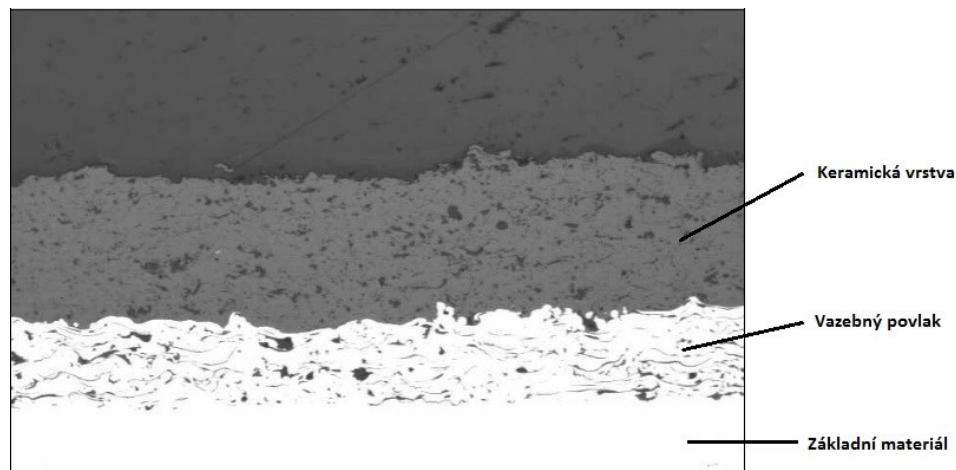
Vazebný povlak vytváří přechodovou oblast mezi keramickým povlakem a substrátem. Vazebný povlak bývá intermetalický nebo metalický, jenž je na bázi PtAl, NiCrAlY, NiCoCrAlY, CoNiCrAlY či CoCrAlY. Látky lze v určitých poměrech kombinovat, čímž je možné ovlivňovat oxidační/korozní odolnost vazebného povlaku. [3, 12]

Funkce tepelných bariér je založena na souhrnném přístupu využívající vzniku a udržitelnosti gradientu teplot mezi základním materiálem součásti a volným povrchem v průběhu tepelné expozice. Běžně tak na povrchu keramického povlaku působí teplota cca 800 – 1200 °C, jejíž velikost lze ovlivnit především konstrukčně na úkor účinnosti celku, tzn. vzdálenost mezi hořáky a stacionárními či rotorovými lopatkami. Kvůli nízké tepelné roztažnosti a obzvláště velmi nízké tepelné vodivosti dochází k redukci působící na povrchu vazebného povlaku. Keramický povlak na rozdíl od vazebného povlaku nezajišťuje za vysokých teplot korozní/oxidační odolnost tepelné bariéry. [12]

Pro zajištění požadované funkce tepelné bariéry a udržení gradientu teplot je potřebná soustava vnitřních chladících kanálů v základním materiálu. Pokud by vnitřní ochlazovací systém chyběl, který je možné přirovnat k izotermické či cyklické tepelné expozici, potom by tepelná bariéra plnila svoji funkci pouze krátkou dobu, jenž lze ovlivnit tepelnou kapacitou či tepelnou setrvačností použitých materiálů, a to do doby než dojde k vyrovnání tepelného gradientu přes celý komplexní systém tepelné bariéry. [12]



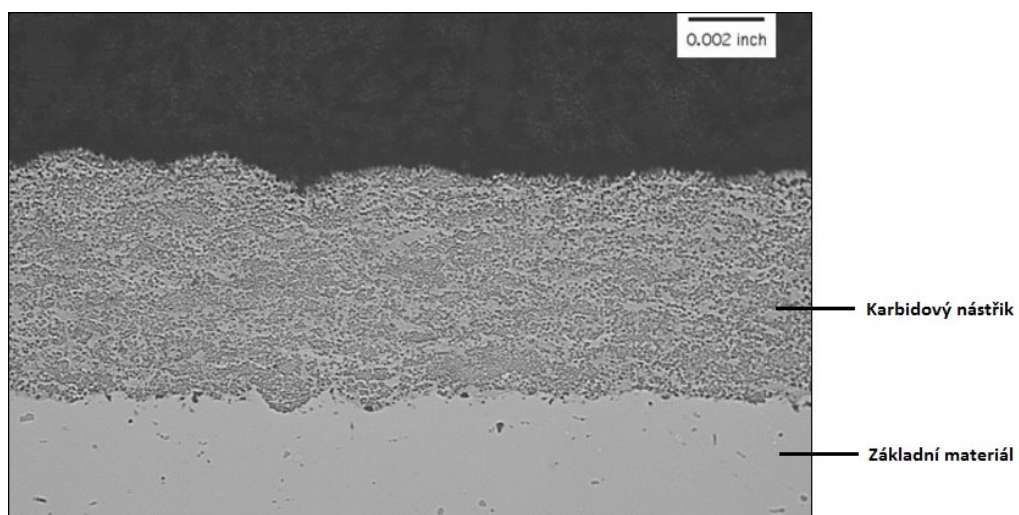
Obr. 1.4 Schéma komplexního povlakového systému tepelných bariér [12]



Obr. 1.5 Metalografický výbrus TBC nástřiku při zvětšení 50× [13]

Povlaky odolávající opotřebení

Povlaky proti opotřebení se používají na spojovací části dílců leteckých turbín a jsou nanášeny na základní materiál bez vazebného povlaku (bond coat). Používané materiály pro povlak jsou karbidy a oxidy kovů. Karbidy jsou vyráběny ve formě cermetů (keramika a kov), které poskytují tvrdost a odolnost povlaků proti opotřebení podobného charakteru jako složky slinutých karbidů, jenž jsou využívány u řezných nástrojů. Oxidy kovů (oxidy chromu) jsou velmi těžké kovy a jsou odolné vůči chemikáliím. Zvláště účinný povlak proti opotřebení je karbid wolframu, protože nabízí mimořádně vysokou úroveň tvrdosti (maximálně 74 HRC), je vysoce odolný vůči extrémním teplotám (až 650 °C) a je dobře odolný proti korozi. [4]

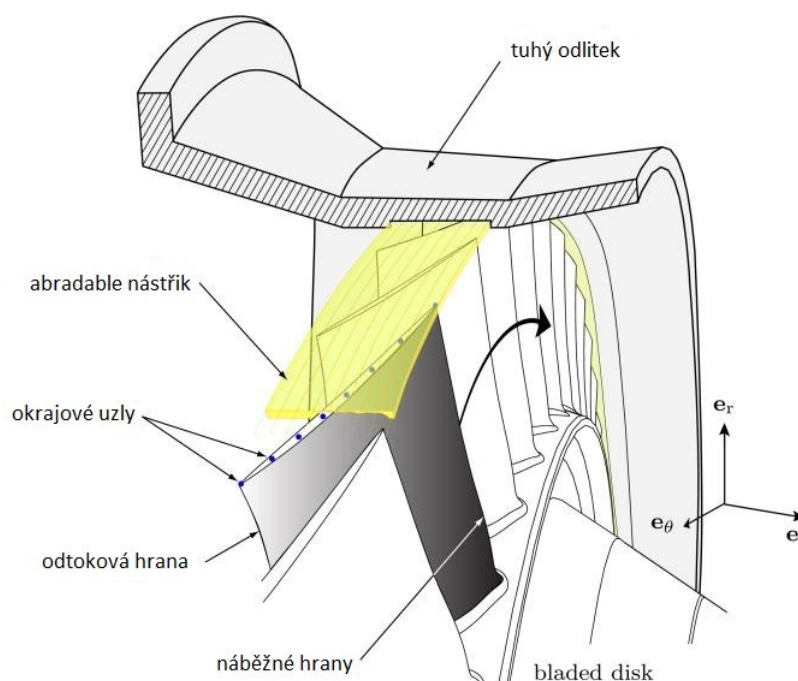


Obr. 1.6 Metalografický výbrus nástřiku odolávajícímu opotřebení při zvětšení 200× [14]

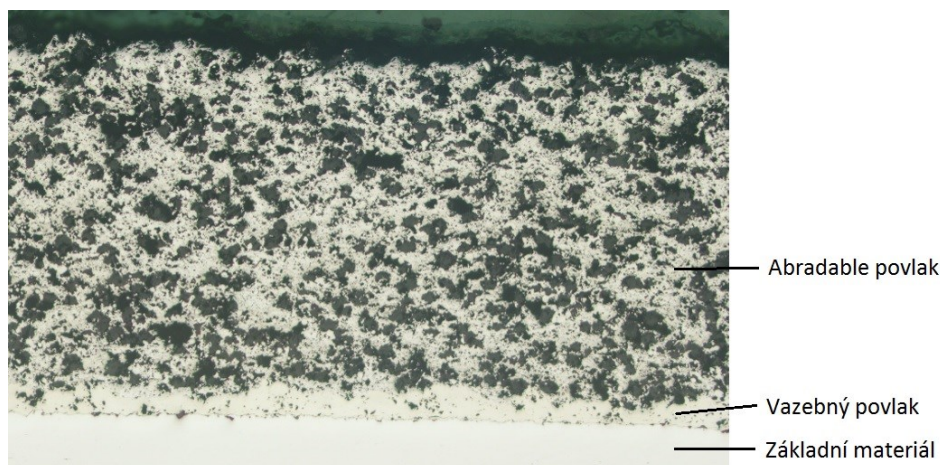
Obrusitelné těsnící povlaky (abradable)

Obrusitelné těsnící povlaky nejsou omezeny pouze na letecké motory. Mohou být použity na většinu rotačních strojů, jenž jsou stacionární plynové turbíny, turbokompresory, radiální kompresory, turbodmychadla a čerpadla. Sulzer Innotec a Sulzer Metco, v úzké spolupráci s předními výrobci tryskových motorů, jsou na světové špičce ve vývoji obrusitelných povlaků. [15]

Obrusitelné těsnící povlaky jsou aplikovány ve formě povlaku, který je nanášen na těsnící kroužky, které jsou rozloženy kolem hřídelí (labyrintových těsnění nebo pomocí břitů na rotorech) nebo proti koncům lopatek (prostor proudění media mezi lopatkami) turbokompresorů a parních turbín. Mezi tyto povlaky a základní materiál se nanáší pomocí žárového nanášení mezivrstva (bond coat), aby byla zabezpečena dostatečná přilnavost k základnímu materiálu. [5]



Obr. 1.7 Schéma umístění těsnící ucpávky (abradable) [6]



Obr. 1.8 Metalografický výbrus abradable nástřiku

1.3 Zdroje tepelné energie

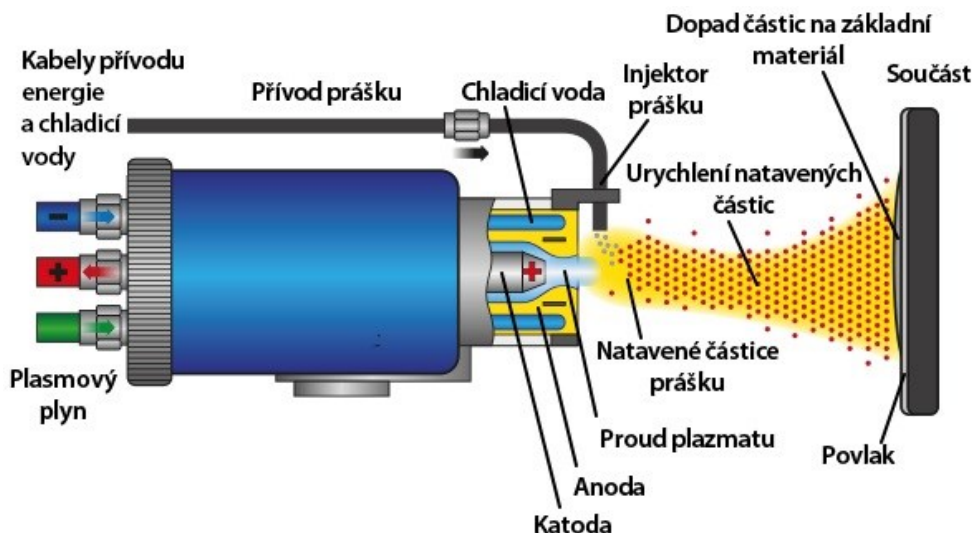
Zdrojem tepelné energie může být spalovací proces nebo elektrická energie, která je zapotřebí k natavení přídavného materiálu ve formě prášku nebo drátu. Podle konstrukce zařízení, zvoleného zdroje energie a přídavného materiálu lze rozdělit na základní typy žárového nástřiku na nástřik plamenem, plazmatický nástřik a nástřik elektrickým obloukem. Rozdělení a popis jednotlivých metod jsou uvedeny v kapitole 1.4. [1]

- Žárové nástřiky – **Spalování**
 - Nástřik plamenem
 - Nástřik drátu
 - Nástřik prášku
 - Vysokorychlostní nástřik HVOF
- **Elektrická energie**
 - Plazmový nástřik (APS, VPS, RFPS, LPPS)
 - Nástřik elektrickým obloukem (TWS)

1.4 Metody žárových nástřiků

Nástřik plazmatickým hořákem

Žárové nanášení pomocí plazmového hořáku je nanášení roztaveného nebo částečně nataveného kovu na povrch povlakované součásti. Přídavný materiál ve formě prášku vstupuje přes injektor, který směřuje kolmo na plamen, do velmi vysoké teploty plazmového plamene, kde se velmi rychle nataví a urychlí směrem k povlakované součásti. Při dopadu na základní materiál se částice rychle ochlazují a vytvářejí povlak. Teplota základního materiálu se udržuje v nízkých hodnotách v průběhu nanášení, aby nedošlo k metalurgickým změnám nebo deformaci materiálu. [7]

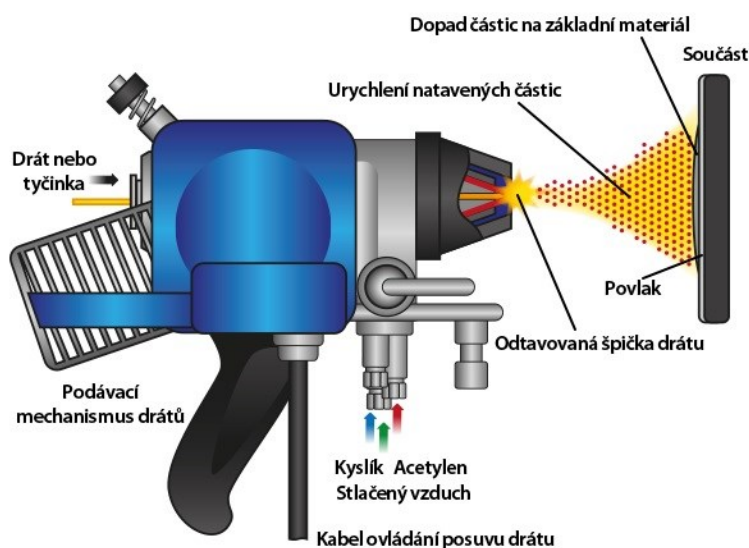


Obr. 1.9 Plazmatický hořák [2]

Tepelným zdrojem využitým pro natavení přídatného materiálu je tzv. nízkoteplotní nebo termická plazma, jenž může být produkována dvěma způsoby. Zařízení pro produkci plazmatu může stabilizovat plazmový plamen buď kapalným nebo plyným plazmotvorným médiem. Při stabilizaci plazmatu plynem hoří elektrický oblouk mezi vodou chlazenou wolframovou katodou a válcovou měděnou anodou, která má ve většině případů zužující se tvar a zároveň tvoří výstupní trysku plazmového hořáku. Jako plazmotvorný plyn se využívá argon, dusík, vodík, helium, který proudí axiálně kolem katody před anodu a pomocí elektrického oblouku je excitován do stavu plazmatu. Vysoká teplota plazmatu (až 20 000 K) a zvolení plazmotvorného media může zapříčinit oxidaci, změnu fázového složení nebo novou chemickou reakci a to, jak na povrchu základního materiálu, tak i na přídatném materiálu. U druhé varianty s kapalinovou stabilizací plazmatu, což je celosvětový český patent, se doposud dosahuje nejvyšší teploty plamene (až 30 000 K) a zpracovatelskou kapacitou 40 – 100 kg prášku za hodinu. Konstrukce hořáků pro plazmové nástřiky se odlišují tvarem a velikostí elektrod, způsobu chlazení nebo materiálem aktivních součástí. Podmínky a geometrie vstupu prášku přes injektor do plamene plazmového hořáku mají značný vliv na stupeň protavení, tudíž na kvalitu výsledného nástřiku a především na výši pórovitosti a obsahu oxidů ve struktuře. Pro docílení optimálních vlastností povlaku, zejména vysoké hustoty, adheze či čistoty je možné realizovat plazmový nástřik v uzavřené komoře za sníženého tlaku (obvykle 0,005 – 0,02 MPa), tzv. VPS (vacuum plasma spraying), popřípadě pouze za snížené tlaku LPPS (low pressure plasma spraying). [7, 8]

Žárový nástřik plamenem

Žárový nástřik plamenem je nejstarším způsobem nanášení. Tento způsob využívá stlačený vzduch nebo kyslík spolu s palivem (acetylen, propylen, propan, vodík). Přídavný materiál ve formě prášku nebo drátu je přiváděn do plamene, vzniklého hořením směsi, středem hořáku. V plameni dojde k natavení přídavného materiálu a urychlení směrem k povlakované součásti. Tímto procesem se vytváří povlaky o nižší kvalitě, které se nevyužívají pro aplikace s vysokou hustotou a přilnavostí povlaku. Největším nedostatkem těchto povlaků je nízká dopadová rychlost a přilnavost, naopak nízké pořizovací i provozní náklady favorizující tuto metodu pro méně náročné aplikace. [1]



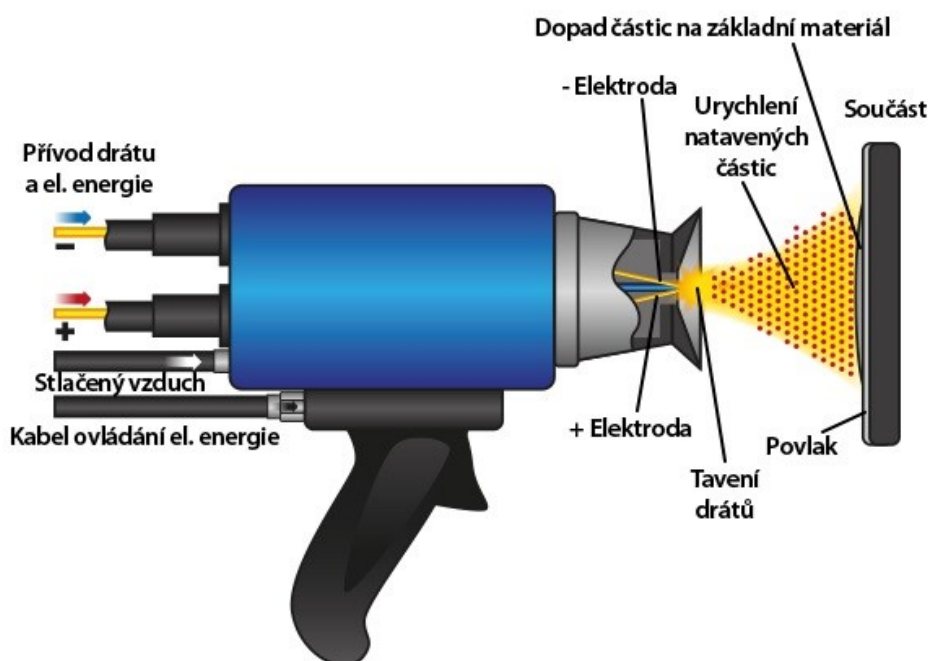
Obr. 1.10 Nástřik plamenem [2]

Materiály používané pro nástřik plamenem jsou, díky malé teplotě plamene, nízkotavitelné kovy (hliník, zinek, babbitt, bronz, polymery). Pro navýšení teploty plamene lze použít přídavného proudu ochranného plynu, jenž umožňuje nástřik materiálů se střední teplotou tavení, jako je ocel, NiCrBSi, Mo a některé druhy oxidů. Nástřik zhotovený z přídavného materiálu ve formě prášku bývá zpravidla homogennější s vyšší hustotou oproti povlaku zhotoveným z drátu nebo tyček. Kovové povlaky často obsahují oxidické částice, naopak polymerní povlaky, zejména nízkotavitelných polymerů, vykazují velmi hustou strukturu a dobrou adhezi. [1]

Nástřik elektrickým obloukem

Metoda pro nástřik elektrickým obloukem využívá přídavný materiál ve formě dvou drátů, kterými proudí elektrický proud a mezi jejichž konci hoří elektrický oblouk. Vzniklá tavenina je rozptýlena stlačeným plynem, obvykle vzduchem, čímž vznikne proud roztavených kapiček nanášeného materiálu dopadajících na povrch povlakované součásti.

Hlavní předností této metody nanášení jsou jednoduchost, mobilita (využívá pouze stlačený vzduch a elektrickou energii), nízké provozní náklady, vysoký výkon (nanáší až 80 kg materiálu za hodinu) a široké spektrum materiálů. Teplotní ovlivnění základního materiálu, oproti ostatním metodám žárového nanášení, je způsobené pouze teplem přineseným na povrch roztavenými kapičkami kovu. Kvalita povlaku závisí především na stabilitě elektrického oblouku mezi konci drátů, tudíž je nezbytné dbát na stabilitu zdroje elektrického proudu a plynulost podávání drátu. [1]



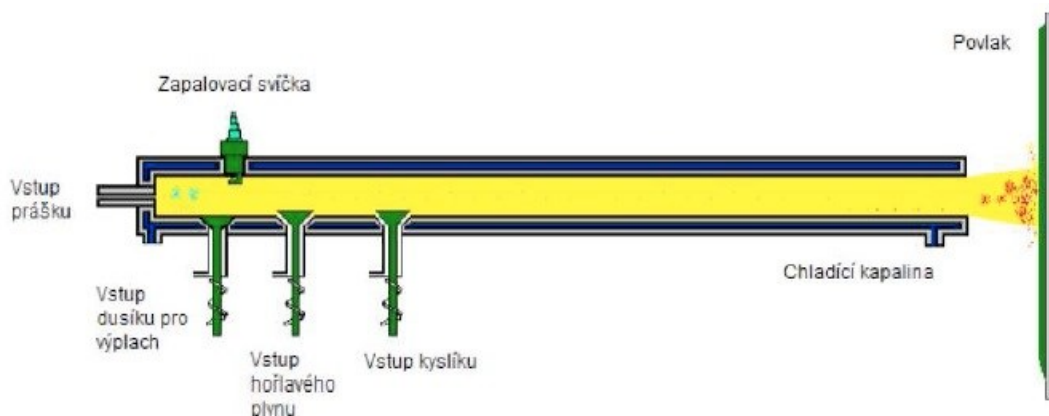
Obr. 1.11 Nástrík elektrickým obloukem [2]

Materiály pro nástrík elektrickým obloukem musí být elektricky vodivé a zároveň natolik tvárné, aby jej bylo možné vyrábět ve formě drátů. Tyto nároky na materiály omezují rozsah především na kovy, i když v současné době vyvíjené tzv. trubičkové dráty umožňují i nástrík cermetů. Charakteristické povlaky pro nástrík elektrickým obloukem jsou povlaky odolné proti korozi na bázi hliníku, zinku, mědi nebo nerezové oceli.

Detonační nástrík

Metoda detonačního nástríku používá kinetickou a tepelnou energii spalovacího procesu plynů, které jsou uzavřeny ve spalovací komoře, do které je přiváděn přídatný materiál ve formě prášku. V porovnání s nástríkem plamenem dosahuje detonační nástrík vyšších teplot i rychlost dopadu. V průběhu nástríku jsou palivové plyny komprimovány ve spalovací komoře, do níž se přivádí přídatný materiál ve formě prášku. Vzniklá směs prášku a plynu je přerušovaně zapalována zapalovací svíčkou, přičemž výbuch plynů natavuje a urychluje částice prášku hrdlem detonačního hořáku směrem k povlakované

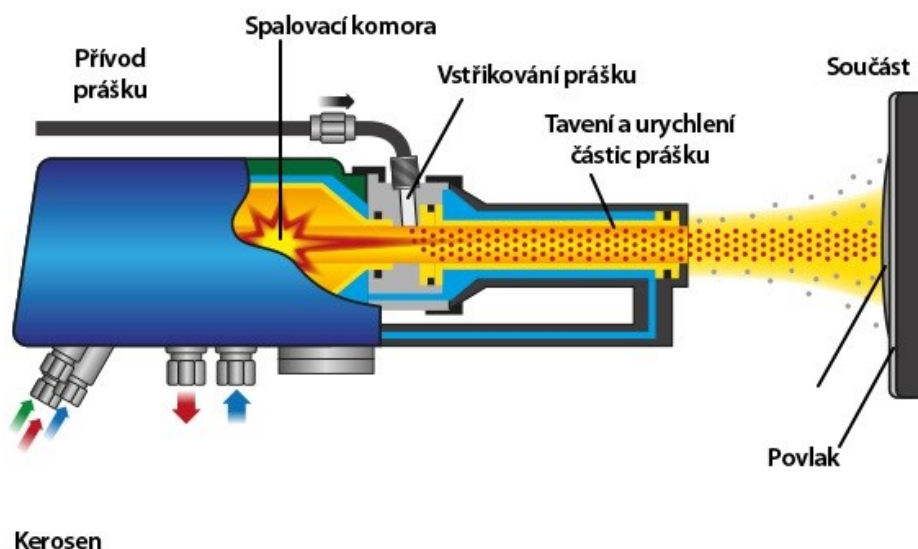
součástí. Následně pomocí dusíku se spalovací komora vyčistí od zbytků částic a oxidů. Ve srovnání s nástřikem plamenem má detonační nástřik vyšší dosaženou teplotu a rychlost částic, což vede k lepší adhezi povlaku, výraznějšímu rozptýlení částic, snížení poréznosti a obsahu oxidických částic ve struktuře. Povlak má vysokou tvrdost díky menší dekarbonizaci materiálu, k níž dochází během nástřiku. [9]



Obr. 1.12 Detonační nástřik [10]

Vysokorychlostní nástřik plamenem HVOF

Metoda vysokorychlostního nástřiku plamenem (dále jen „HVOF“) je principiálně podobná metodě detonačního nástřiku pouze s tím rozdílem, že hoření plynů a plnění spalovací komory probíhá kontinuálně. Speciální design hořáku zajišťuje nepřetržité hoření směsi kyslík – palivo. Jako palivo může být využit kerosin, propylen, vodík, acetylen atd.. Výsledné produkty hoření jsou urychlovány v konvergentně divergentní trysce až na supersonické hodnoty. Přídavný materiál ve formě prášku je dopravován pomocí nosného plynu dusíku do supersonického plamene radiálně z protilehlých stran do difuzoru, kde dojde k jeho natavení a přes trysku k urychlení směrem k povlakované součásti. Natavené částice přídavného materiálu, díky jejich vysoké rychlosti, způsobí při dopadu dokonalé rozptýlení a zakotvení částic k substrátu, proto mají HVOF povlaky vysokou hustotu a přilnavost. Relativně nízká teplota plamene, ve srovnání s plazmatickým nástřikem, cca 2600 °C redukuje technologii HVOF pro nástřik keramických povlaků, ale výrazně omezuje oxidaci, fázové přeměny a vyhořívání některých prvků nanášeného materiálu v průběhu nástřiku. Tato metoda poskytuje jedinečnou vlastnost oproti ostatním metodám žárového nástřiku a to tlakové pnutí v povlaku, které podstatně zvyšuje přilnavost nástřiku k základnímu materiálu a také příznivě ovlivňuje únavové vlastnosti povlakovaných součástí. Technologie předurčuje, kvůli nízké teplotě plamene, k nástřiku kovů a jejich slitin s nízkou a střední teplotou tavení. Používanými materiály jsou cermety, nejčastěji na bázi karbidů wolframu a chromu. [1, 11]



Obr. 1.13 Vysokorychlostní nástřik plamenem [2]

1.5 Porovnání metod žárového nástřiku

Základní charakteristiky jednotlivých technologií, využívané materiály, typické vlastnosti žárových nástřiků a jejich vhodné aplikace jsou shrnuty [1]

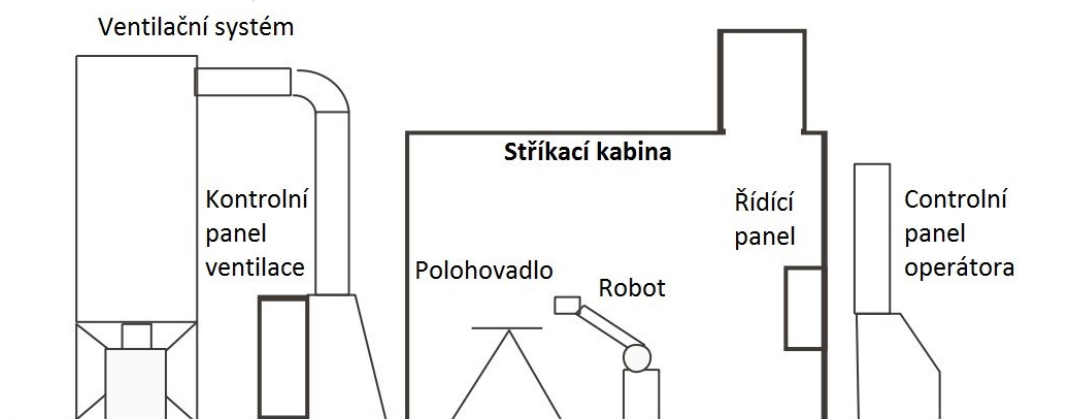
Tab. 1.1 Základní charakteristiky technologií žárových nástřiků [1]

Technologie	HVOF	Plasma	El. oblouk	Plamen
Forma materiálu	prášek	prášek	drát	prášek/drát
Teplota plamene [°C]	~3000	~ 5000-25000	~ 3000-6000	~ 2700-3000
Rychlost částic [m/s]	~ 400-800	~ 80-300	~ 50-150	~ 80-100
Typické materiály	kovy, slitiny, cermety	keramika	kovy, slitiny, cermety (trub. dráty)	kovy, slitiny, plasty
Vlastnosti povlaku	velká hustota, výborná adheze, tlakové pnutí	porézní v případě keramik	větší tloušťka, vysoká hustota	vyšší porezita a obsah oxidů
Vhodné aplikace	ochrana proti opotřebení, korozi	tepelné bariéry, izolátory	otěruvzdorné povlaky, renovace	klasická metalizace, méně náročné

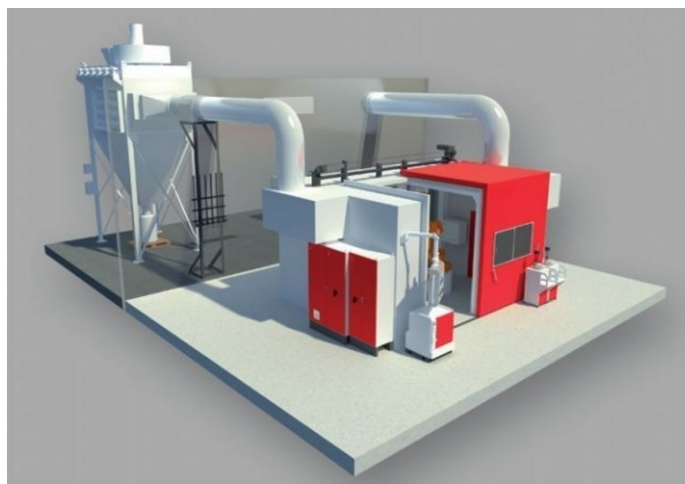
1.6 Zařízení pro termální nástřik

Zařízení pro termální nástřik se především navrhuje tak, aby odpovídalo všem požadavkům z hlediska bezpečnosti práce, hygieny práce a požadavkům na životní prostředí. Stříkácí kabina je konturována s modulární konstrukcí panelu. Jednotlivé panely jsou vyrobeny ze sendvičové konstrukce a zvukově absorpčních materiálů různé hustoty, jenž tlumí vysokou hodnotu hlučnosti, která je jedním z hlavních nebezpečí procesu pro operátora. Dalším nebezpečím je rozptýlený prach, nástřikový prášek, zbytky plynů, či par uvnitř kabiny, které jsou odsávány pomocí vedení do filtračních komor. Filtrační systém je zpravidla umisťován do venkovních prostor. V průběhu procesu termálního nástřiku vzniká silné viditelné světlo a ultrafialové záření, před kterým je potřeba chránit fóliemi. [26]

Pro dosažení požadované kvality nástřiku a opakovatelnosti výroby, zvláště v leteckém průmyslu, je vyžadováno řízení procesu. Jednak se využívá průmyslových robotů a dvouosých polohovadel, jenž zabezpečí konstantní rychlost po celou dobu nástřiku. Průmysloví roboti zabezpečí opakovatelnou, předem naprogramovanou dráhu hořáku a souměrnou tloušťku nástřiku po celé kontuře dílce. Druhým aspektem je dodržení všech nastavených veličin, jakož je proud, napětí, průtoky plynů, detekce chlazení a jiné. [26]



Obr. 1.14 Typická konfigurace zařízení pro termální nástřik [26]



Obr. 1.15 Vizualizace zařízení pro nástřik [27]

2. Teorie obrábění

2.1 Silové vztahy procesu řezání

Ve shodě s energetickou rovnováhou procesu řezání musí být v rovnováze silové vztahy, což je řezný odpor R , který klade materiál proti oddělení třísky na jedné straně, a síla, kterou nástroj působí na odřezávanou vrstvu a plochu řezu, tzv. řezná síla F , na straně druhé. [17]

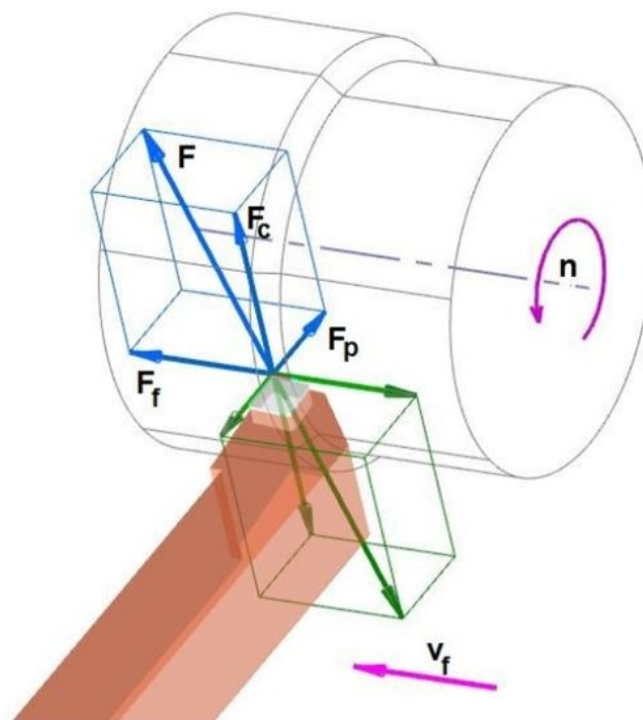
Řezné síly

Celková řezná síla F a její složky, které jsou potřeba k vynaložení při obrábění – řezná složka síly řezání F_c , posuvová síla F_f a pasivní síla F_p se pro podélné soustružení válcové plochy stanoví na základě následujících uvedených empirických vztahů: [16, 17]

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad [\text{N}] \quad 2.1.1$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \quad [\text{N}] \quad 2.1.2$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad [\text{N}] \quad 2.1.3$$



Obr. 2.1 Vyobrazení jednotlivých složek řezné síly [18]

Při známé hodnotě měrné řezné síly k_c lze vypočítat řezná síla F_c a následně síly F_f a F_p se určí ve vhodném poměru k F_c . Průměrné hodnoty konstant c_F a exponentů x_F , y_F

pro aplikaci vztahů pro výpočet F_c , F_p a F_f při soustružení jsou dané podmínky řezného procesu empiricky dané. [16]

Pro vypočtené síly F_c , F_p , F_f se celková řezná síla určí ze vztahu 2.1.4: [16]

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \text{ [N]} \quad 2.1.4$$

Měrný řezný odpor

Velikost řezného odporu, jenž nástroj překonává při řezání, stanovují především fyzikální vlastnosti materiálu obrobku a velikost průřezu odřezávané vrstvy materiálu. Jsou ovlivňovány i ostatními řeznými podmínkami, jakož je tvar průřezu třísky, geometrie břitu, řezné prostředí apod. Stejně faktory mají největší vliv na velikost primární složky řezného odporu, resp. řezné síly na složku F_c . Poměr síly a průřezu třísky je definován jako měrný řezný odpor p , který se vypočítá vztahem 2.1.5: [17]

$$p = \frac{F_c}{S} \text{ [MPa]} \quad 2.1.5$$

Také se může měrný řezný odpor, resp. měrnou řeznou sílu definovat jako sílu ve směru primárního řezného pohybu vztaženou na průřez třísky 1 mm^2 . Pokud je známa velikost řezné síly pro daný způsob obrábění (při zaručeném materiálu obrobku a řezných podmínkách), lze pro všechny způsoby obrábění a průřezy třísky $S \text{ [mm}^2\text{]}$ stanovit velikost tangenciální řezné síly rovnice: [17]

$$F_c = p \cdot S \text{ [N]} \quad 2.1.6$$

Měrná řezná síla se mění s použitými řeznými podmínkami, tudíž není konstantní pro určitý obráběný materiál. Zejména její velikost ovlivňuje tloušťka třísky a , dále úhel řezu δ , řezná rychlost v , při daném průřezu třísky úhel κ a poměr $a:b$. Částečně na její velikost působí poloměr zaoblení špičky nože r , úhel α a řezné prostředí. [17]

Velikost měrné řezné síly ovlivňuje obráběný materiál zvláště svojí pevností, tvrdostí, houževnatostí a zpevňovací schopností, jenž spolu s některými řeznými podmínkami určují velikost deformační práce a práce tření. [17]

Měření řezných sil

Exponenty a koeficienty převzaté z literatury nezaručí požadovanou přesnost. Je-li zapotřebí stanovit dynamiku procesu obrábění nebo stanovit složky řezné síly s vyšší přesností, musí se provést měření řezných sil. [28]

Složky řezné síly lze měřit dvěma způsoby: [28]

- nepřímým měření sil – měří se kroutící moment nebo příkon, a z něhož se vypočte řezná síla,
- přímým měření sil – dynamometry.

Přímé měření sil a momentů

Pro přímé měření sil a momentů se využívá dynamometrů, které umožňují měření jedné, dvou nebo tří složek řezné síly, popř. kroutícího momentu. Základním prvkem je pružný element, jenž se deformuje působením měřené síly. Deformace elementu se měří snímačem a převádí se na jinou veličinou, kterou lze registrovat a měřit. [28]

Základní kladené požadavky na dynamometry: [28]

- citlivost,
- tuhost,
- stálost údajů,
- reprodukovatelnost údajů.

Soustava přístrojů na měření složek síly se obvykle skládá ze tří částí: [28]

1. pružný člen – překonává změny a přebírá vnější zatížení,
2. snímač – transformuje mechanickou veličinu pružného členu na hodnotu analogického parametru měřicí soustavy,
3. přijímač – zpracovává signál snímače a zesiluje ho, popřípadě zaznamenává velikost zatížení.

Dle toho, na kterou veličinu převádí snímač měřenou sílu, lze dynamometry dělit na: [28]

- mechanické – přeměna pružného elementu je měřena mechanicky – číselníkovým úchylkoměrem,
- hydraulické – důsledkem průhybu nástroje je změna tlaku v hydraulickém systému, kdy je tato změna snímána manometrem,
- pneumatické – průhyb deformačního prvku je měřen množstvím vzduchu protékajícího tryskou
- elektrické – dle různých fyzikálních principů se síla mění na elektrickou veličinu, jejíž měření je snadné i dobře zpracovatelné výpočetní technikou. Podle druhu použitého snímače se dělí elektrické dynamometry na odporové, piezoelektrické, indukční, kapacitní, ostatní.

Požadavky na konstrukci dynamometru

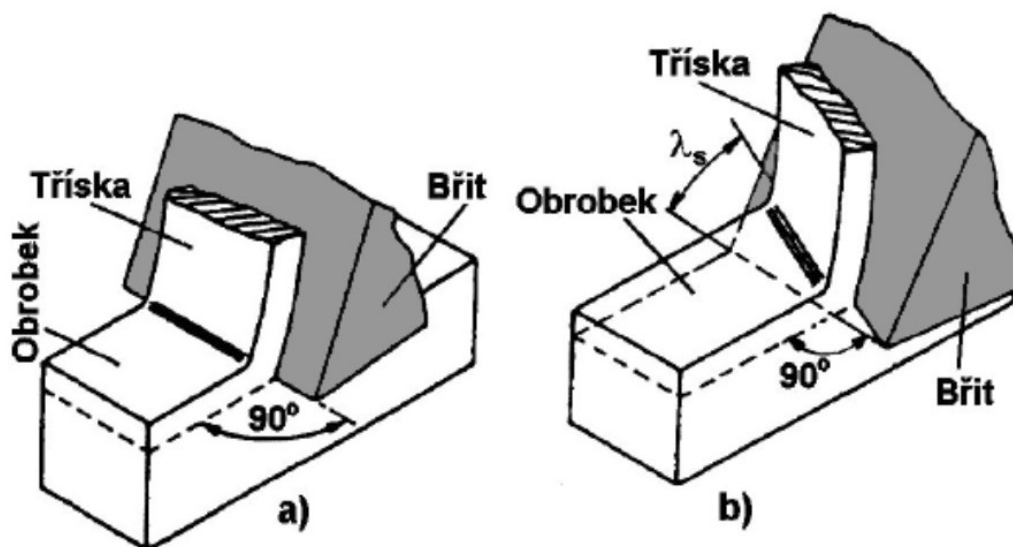
Toto měřicí zařízení musí splňovat požadavky na něho kladené, a to jak ve vztahu k soustavě stroj – nástroj – obrobek, do níž je jako cizí element vložen, tak ve vztahu k výsledkům měření, které jsou od něho očekávány. Dynamometr musí splňovat požadavky na tuhost, která by měla být vyšší než tuhost soustavy, vysoká vlastní frekvence, přesnost měření, citlivost, rozsah měření, časová stálost cejchování, minimální závislost na parazitních vlivech a spolehlivosti. [28]



Obr. 2.2 Dynamometry Kistler pro měření složek řezné síly [29]

2.2 Fyzikální základy procesu řezání

Proces řezání se uskutečňuje v obráběcím systému stroj-obrobek-nástroj, přičemž hlavním výstupem jsou parametry obrobené plochy. Díky tomuto hledisku má zvláštní význam problematika identifikovaného mechanismu tvoření třísky. Řezný proces lze realizovat jako obecné nebo ortogonální řezání viz obrázek 2.3. [16]



Obr. 2.3 Realizace řezného procesu: a) ortogonální řezání, b) obecné řezání [16]

Při ortogonálním řezání se daná problematika řeší v rovině, jelikož je ostří kolmé na směr řezného pohybu. Tento způsob řezání se provádí u zapichování, frézování s nástrojem s přímými zuby, protahování. U druhého obecného řezání je potřeba danou problematiku řešit v prostoru, jelikož je ostří skloněno o úhel λ_s . Způsob řezání se uskutečňuje u podélné soustružení, vrtání, frézování nástrojem se zuby ve šroubovici. [16]

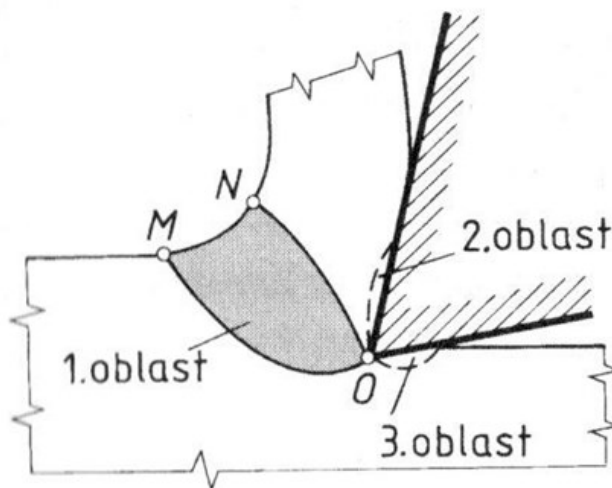
Při obrábění se koná proces oddělování třísky působením trvalého zatěžování odřezávané vrstvy řezným nástrojem. U krystalických a nekystalických látek je mechanismus vzniku a oddělování třísky různý. U obrábění krystalických látek dochází při vnikání břitu nástroje do obrobku k plastické deformaci obráběného materiálu a vzniká tříška tvářená. U nekystalických látek se tříška odděluje křehkým lomem nebo štěpením, kde nedochází k plastické deformaci a výsledná tříška je netvárná. [16]

Obráběné technické materiály, které se v praxi obrábějí, tvoří materiály krystalické, a to zejména kovy. Studie v rovině teoretické a experimentální se u těchto materiálů realizují zpravidla pro případ ortogonálního řezání. [16]

Plastické deformace v oblasti tvoření třísky při ortogonálním řezání

V průběhu řezného procesu dochází v oblasti tvoření třísky k pružným a následně plastickým deformacím v odřezávané vrstvě. Plastické deformace probíhají ve třech následujících oblastech: [16, 19]

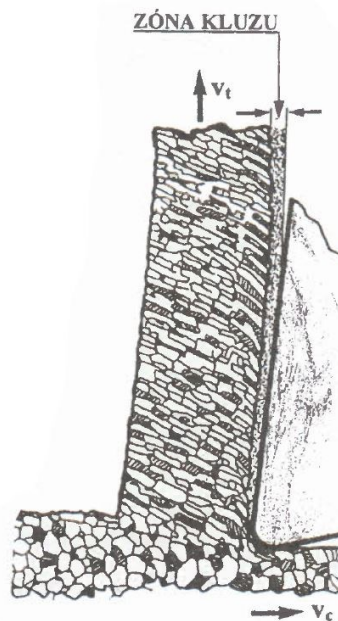
- 1. oblast – oblast primární plastické deformace, která probíhá před břitem nástroje a je ohraničená body MNO
- 2. oblast – oblast sekundární plastické deformace, která probíhá v povrchových vrstvách třísky ve styku s čelem nástroje
- 3. oblast – oblast terciální plastické deformace, ležící v povrchové vrstvě řezné plochy, popř. obrobené plochy



Obr. 2.4 Oblast plastických deformací [19]

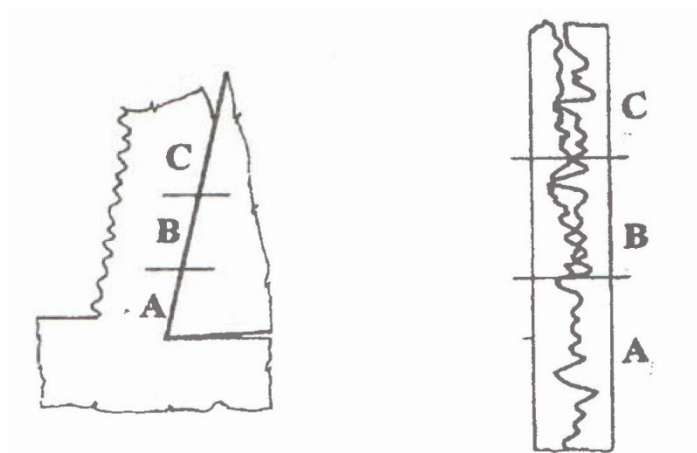
Nárůstek a jeho vliv na řezný proces

Po čele nástroje probíhá pohyb třísky za vysokých teplot a velkých tlaků. Mezi odcházející třískou a čelem nástroje vzniká tangenciální síla působící na čele nástroje F_y , která za jistých řezných podmínek může způsobit zadírání. Rychlost třísky vzrůstá v oblasti plochy styku z teoretické nuly do značných hodnot při dalším pohybu po čele nástroje, a následně se může projevit vznikem zóny kluzu mezi třískou a povrchovou plochou čela, v níž za vysokých teplot vzniká tavenina kovu. [16]



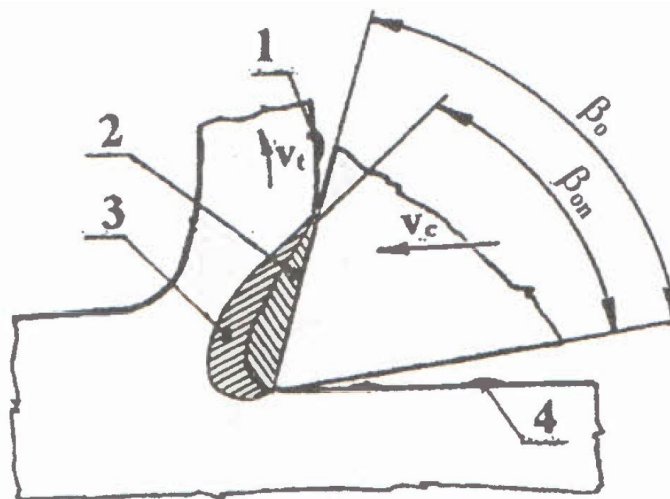
Obr. 2.5 Znárodnění zóny kluzu při pohybu třísky po čele nástroje [16]

Kontakt mezi třískou a nástrojem na kontaktní dráze lze rozdělit do tří úseků, viz obrázek 2.6. [16]



Obr. 2.6 Kontakt mezi třískou a čelem nástroje [16]

A – ulpívání materiálu třísky; B – adheze a difuze; C – abraze



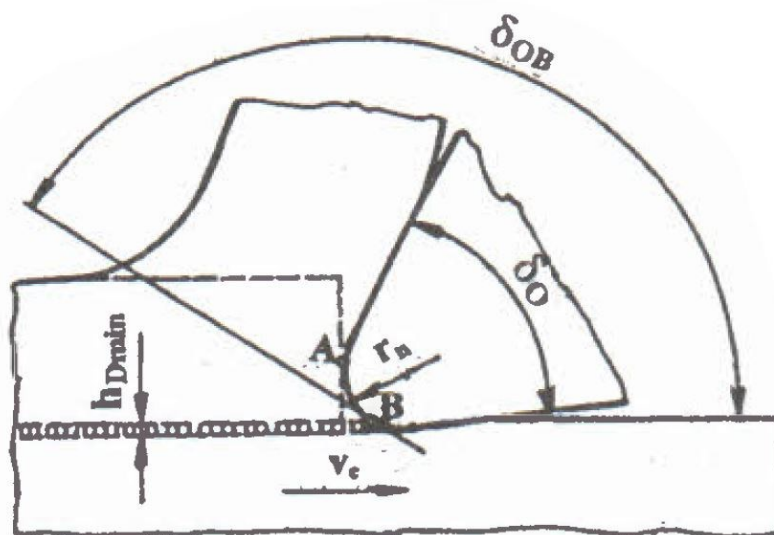
Obr. 2.7 Tvorba a rozpad nárůstku [16]

1 – částice nárůstku odcházející s třískou; 2 – stabilní část nárůstku; 3 – nestabilní část nárůstku; 4 – částice nárůstku ulpívající na obrobené ploše; β_{on} – ortogonální úhel bříty vytvořený nárůstkem

Na břítu nástroje se vytváří nárůstek, který představuje „studený návar“ materiálu obrobku. Jako fyzikální jev vzniká nárůstek za určitého stavu řezného procesu a za určitých podmínek. Nárůstek je nestabilní, vzniká a zaniká mezi frekvencí 10^2 a 10^3 Hz. Při rozpadu částice nárůstku ulpívající jednak na třísku, se kterou odchází a způsobují vyšší opotřebení čela nástroje. Zbylé částice ulpívají na obrobené ploše, kterou poškozují a zhoršují její jakost. Zamezení vzniku nárůstku je možné provést změnou řezných podmínek např. zvýšením řezné rychlosti, použitím vhodné řezné kapaliny, lapováním čelní plochy nástroje atd. [16]

Mechanické vlastnosti povrchové vrstvy obrobené plochy

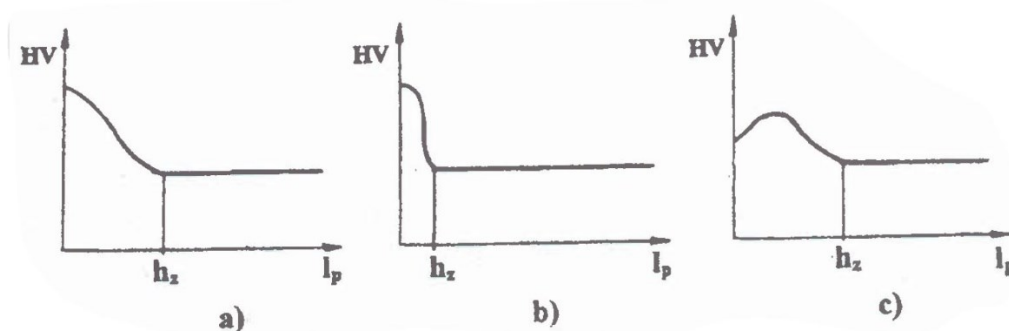
Následkem řezného procesu dochází ke změnám mechanických vlastností v povrchové vrstvě obrobené plochy, a to zejména k strukturním změnám, různým vadám, zpevnění, zbytkovým napětím apod. Zpevnění povrchové vrstvy způsobuje výrazně to, že oblast primárních plastických deformací zasahuje pod úroveň budoucího povrchu, jenž je vyobrazeno na obrázku 2.4. Další faktor ovlivňující zpevnění povrchové vrstvy souvisí se skutečností, že reálné ostří není tvořeno přímkou, ale určitým způsobem zaobleno. V bezprostředním vzájemném působení bříty nástroje s materiálem obrobku se realizuje negativní úhel čela a následný povrch obrobené plochy nevzniká řezáním, ale tvářením. S tímto jevem souvisí určitá minimální hodnota jmenovité tloušťky řezu, jenž je pro dané podmínky realizovatelná, viz. obrázek 2.8. [16]



Obr. 2.8 Ortogonální řezání nástrojem s reálným ostřím [16]

δ_{OB} – nástrojový ortogonální úhel řezu v bodě B reálného ostří; h_{Dmin} – minimální hodnota jmenovité tloušťky řezu

Zpevnění povrchové vrstvy lze kvalifikovat hodnotou mikrotvrdosti a její typické průběhy v závislosti na vzdálenosti od povrchu jsou znázorněny na obrázku 2.9. [16]



Obr. 2.9 Charakteristické průběhy zpevnění v povrchové vrstvě [16]

HV – mikrotvrdost; l_p – vzdálenost od povrchu; h_z – hloubka zpevněné vrstvy

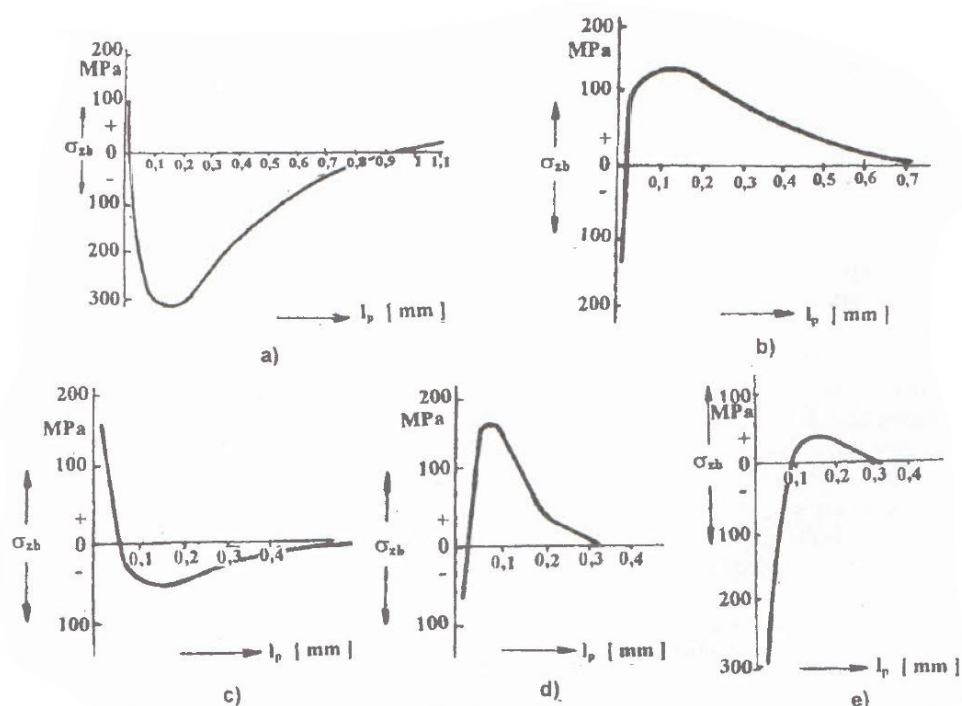
Z hlediska funkčních vlastností povrchu součásti je výhodný průběh na obrázku 2.13a, kde největší mikrotvrdost HV je na povrchu a následně postupně klesá a hloubka zpevněné vrstvy h_z je relativně velká. Na druhém obrázku 2.13b je povrchová tvrdost velká, ale prudký pokles tvrdosti je spojen s nebezpečím odlupování povrchové vrstvy. Průběh na třetím obrázku 2.13 zobrazuje povrch, u níž proběhla plastická deformace, přičemž plasticita materiálu byla plně vyčerpána. Dalším silovým působením vznikají trhliny na povrchu, a to způsobuje pokles tvrdosti, která může být i ve výjimečných případech i nižší než původní tvrdost materiálu. [16]

Předpokladem pro vznik zbytkového napětí v povrchové vrstvě je nerovnoměrná plastická deformace. Ke vzniku zbytkových napětí v povrchové vrstvě jsou potřeba následující základní mechanismy: [16]

- nerovnoměrná plastická deformace,
- teplotní roztažnost při nerovnoměrném ohřevu nebo ochlazování,
- strukturní změny materiálu v tuhém stavu – dochází k nim za vysokých teplot,
- chemické procesy – vznikají chemické sloučeniny s různou hustotou v důsledku difuze a působení řezného prostředí.

Jestliže převažuje při obrábění plastická deformace, bez výrazného tepelného účinku, potom v absolutní většině případů dochází k vytvoření tlakového napětí na povrchu. To je z pohledu funkce povrchu součásti užitečné, se zřetelem na to, že případné zárodky trhlin jsou tlakem zavírány. Při současném mechanickém a tepelném zatěžování povrchu je nejteplejší, horní část povrchové vrstvy při obrábění plasticky zkrácena. Následně při chladnutí se v této zkrácené vrstvě tvoří tahové napětí, které je z hlediska funkčních vlastností povrchu nevýhodně, protože může dojít k únavovým lomům a vzniku trhlin. Tepelný i mechanický mechanismus se může dále kombinovat s třetím, což jsou strukturní změny v materiálu, a čtvrtým – chemické procesy. Chemické a strukturní změny zapříčiní, buď zvětšení objemu materiálu, nebo zmenšení objemu materiálu. Zvětšení objemu materiálu brání okolní materiál, jenž zůstal nezměněn a v takto ovlivněném materiálu vzniká tah. Ke zmenšení objemu vzniká v ovlivněném materiálu tah. Všechny čtyři mechanismy se mohou uplatňovat při technologických procesech, ale potom průběh zbytkových napětí je v povrchové vrstvě složitý. [16]

Příklad průběhu zbytkových napětí je na obrázku 2.10, kde je zobrazen průběh zbytkových napětí v povrchové vrstvě lopatky turbokompresoru z oceli 10Ch17N2 v průběhu odlišných technologických operací. [16]



Obr. 2.10 Průběh zbytkových napětí v povrchové vrstvě [16]

a – kování; b – hrubé frézování; c – jemné frézování; d – broušení; e – balotínování

2.3 Obrábění žárového nástřiku

Správný výběr technologického postupu, pro dodatečné a konečné úpravy po nástřiku, závisí na správné funkčnosti žárově stříkaných součástí. V průběhu úprav a mechanického opracování žárového nástřiku je nutné dbát především na vlastnosti lamelární struktury, která se značně odlišuje od stejného materiálu v tvářeném nebo litém stavu. Technologické postupy, vhodné pro tvářené nebo lité materiály, by nejspíše žárový nástřik poškodily. Z uvedených důvodů nelze u žárových nástřiků využít společné základy technologických postupů třískového obrábění. V povlacích se vyskytuje mnoho odlišných tvrdých fází, např. karbidy, oxidy, silicidy, boridy, což vyžaduje věnovat vysokou pozornost volbě geometrie bříty, kvůli předejití opotřebení nástroje. [20]

Třískové obrábění žárového nástřiku

Soustružení žárově stříkaného kovového povlaku je podmíněno specifickými vlastnostmi žárového nástřiku, postupu a typu aplikace, a také na tvrdosti a struktuře nástřiku. U některých velmi tvrdých a houževnatých materiálů je nutné nejdříve soustružením odebrat hrubou povrchovou vrstvu a vhodně volit řezné parametry obrábění a řeznou geometrii nástroje. Dosáhne se tak požadovaného obráběného povrchu a předejde se opotřebení nástroje. Ve speciálních případech je možno obrábět žárové

nástřiky i frézováním. Při volbě posuvu, rychlostí a výběru nástroje je třeba vzít v úvahu stejné aspekty jako u soustružení. [20]

Při obrábění žárově stříkaných povlaků z natavitelných slitin, které byly přetaveny pro dosažení hutné struktury, lze využít řeznou kapalinu pro zabránění jejich přehřátí. Při obrábění povlaků po nastříkání se nesmí použít chlazení, protože mikroskopické póry v žárovém nástřiku zapříčiňují pronikání řezné kapaliny do nástřiku, což vede k odbarvení a další problémy. V oblastech s vysokým hydraulickým tlakem může dojít při použití řezné kapaliny k částečnému nebo úplnému odstranění částic z povlaku, a to vede k vzniku nevyhovující povrchové úpravy. [20]

Volba řezného nástroje

Při volbě řezného nástroje je nutné se zaměřit, jaký typ žárového nástřiku je obráběn. Při obrábění žárově stříkaných kovových povlacích obsahujících tvrdé fáze a extrémní zpevnění některých nanášených částic je soustružnický nůž nebo vyměnitelná břitová destička více zatížena, oproti obrábění kovaného nebo litého materiálu stejného nebo podobného složení. Z důvodu vysokého zatížení řezného nástroje je nutné využít keramické řezné materiály a slinuté karbidy, které se obvykle využívají k soustružení tvrzené litiny, šedé litiny a temperované litiny. Žárově stříkané povlaky mědi nebo hliníku lze soustružit nástroji z rychlořezné oceli. Použitím slinutých karbidů jakosti K01 a K10 lze dosáhnout dobrých strojních časů. Použitím nástrojů z polykrystalického kubického nitridu bóru, slinutého na tělese ze slinutého karbidu umožňuje přijatelné soustružení povlaků o tvrdostech $X > 700 \text{ HV (HRC)}$. [20]

3. Měřicí metody

3.1 Měření tvrdosti povrchu

Tvrdost je mechanická vlastnost, která je velice důležitá v technické praxi obzvláště pro kovové materiály a lze zjistit pomocí řady mechanických zkoušek. Využívané metody pro měření tvrdosti prakticky neporušují měřenou součást. Dle hodnoty tvrdosti lze odhadnout další vlastnosti materiálu. Nejčastěji se pro tyto účely využívají empirické koeficienty. [21]

Tvrdost materiálu je definována jako odpor, jenž klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Hodnoty tvrdosti se uvádějí jednotkou $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ nebo bezrozměrně. Použitím jednotky může dojít k záměně za pevnost, proto se zpravidla uvádí tvrdost bezrozměrně s udáním způsobu měření nebo stupnice. [21]

Rozdělení zkoušek tvrdosti: [21]

- statické – tvrdost podle Brinella, Knoop, Rockwella, Vickerse,
- dynamické – Poldi Kladívko, Baumanovo kladívko, Shoreho skleroskop, duroskop.

Zkouška tvrdosti podle Brinella

Zkouška tvrdosti dle Brinella je celosvětově rozšířená metoda měření tvrdosti, která zjišťuje odpor materiálu proti vnikání kuličky daného průměru. Tato metoda je vhodná pro měření tvrdosti heterogenních, měkčích materiálů s hrubozrnnou strukturou a výrobky s texturou po tváření. Z výsledku zkoušky lze odvodit mez pevnosti materiálu podle vzorce: [22]

$$R_m = k \cdot HB \quad 3.1.1$$

kde:

R_m – pevnost materiálu

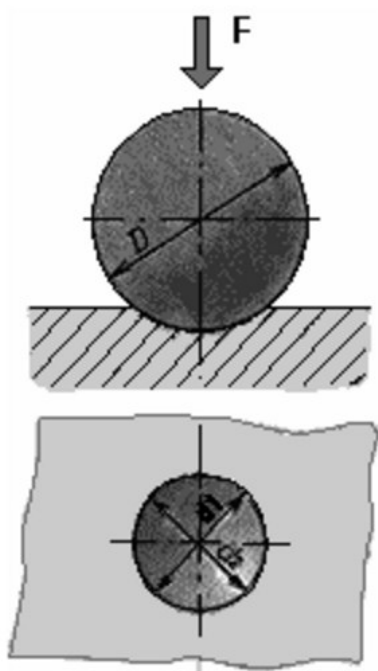
k – konstanta dle materiálu.

Brinellova metoda používá jako indenter ocelovou kuličku. Využívané průměry kuliček jsou 1 mm, 2,5 mm, 5 mm a 10 mm. Průměr kuličky se určí tak, aby deformovaná oblast byla výhradně ve zkoušeném vzorku, proto musí být nejmenší tloušťka materiálu minimálně osminásobek hloubky vtisku. Dalším kritériem pro volbu kuličky je velikost zrn měřeného materiálu. Kulička by měla zasahovat do, co největšího počtu zrn. [22]

Postup měřicího cyklu: [22]

1. Volba vhodného místa pro vtisk a najetí indentoru nad něj.
2. Postupné zatěžování indentoru na vybranou nominální hodnotu zátěže.

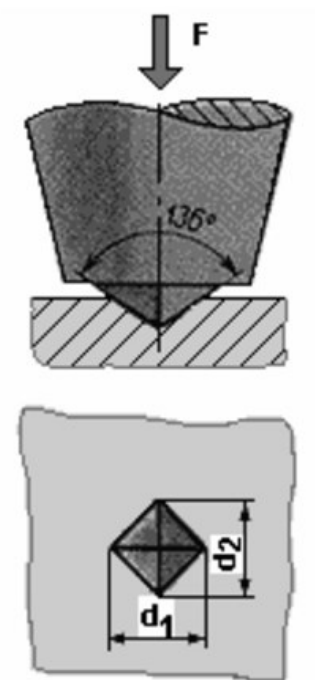
3. Výdrž na zátěži – standartně u slitin železa 10 – 15 s, u neželezných slitin 10 – 180 s.
4. Odlehčení indentoru a najetí objektivu pro měření nad vtisk.
5. Změření průměru vtisku a výpočet tvrdosti.



Obr. 3.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella [21]

Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Zkouška tvrdosti dle Vickerse je jedna z nejrozšířenějších metod měření. Je vhodná pro měření průběhů tvrdosti na řezech materiálů, tzv. mikrotvrdost zatíženích od 10 gramů do 1, či 0,5 kg, ale i pro měření tvrdosti povrchů při zatíženích do cca 50 kg. Indentor pro měření podle Vickerse má tvar jednostranného jehlanu s vrcholovým úhlem 136° . Vytvořená hloubka vtisku tímto indentorem odpovídá asi $1/7$ délky jeho úhlopříčky. Hloubka vtisku indentorem odpovídá při spojitém zatížení okolo dvojnásobku hloubky vtisku vytvořeného indentorem dle Knoop. Z čehož vyplývá, že měření podle Vickerse je méně citlivé na kvalitu testovaného povrchu. [23]

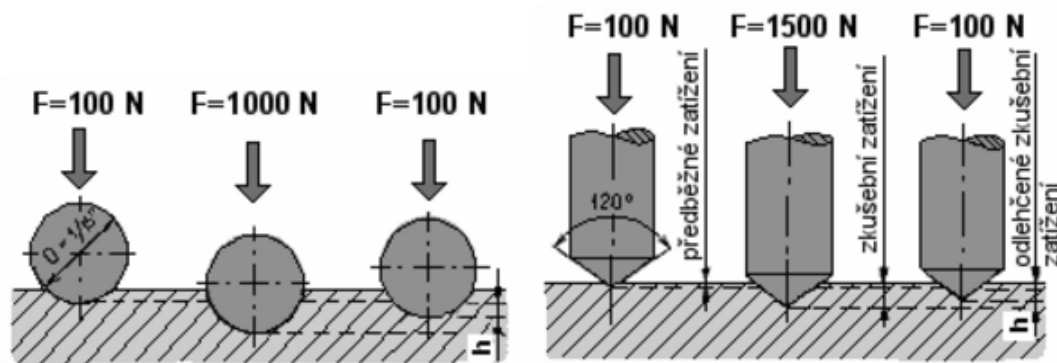


Obr. 3.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Zkouška tvrdosti dle Rockwella je metoda stanovení tvrdosti materiálu na základě hloubky vniku indentoru, ve formě diamantového kuželu nebo ocelové kuličky, do zkoušeného vzorku. Zjišťují se rozdíly hloubky vtisku mezi dvěma stupni zatížení, a to předběžného a celkového. Důvodem předběžného zatížení je vyloučit z měřené hloubky nepřesnosti povrchových ploch, a proto je měření dosti rychlé a nenáročné na úpravu povrchu. Kužel má vrcholový úhel 120° a poloměr kulové části 0,2 mm (HRA, HRC). Kulička odpovídá průměru 1,5875 (HRB). [21, 24]

Při měření se zkušební vzorek umístí na stůl přístroje a pomalu dojde k přiblížení a dotknutí indentoru ke zkušebnímu vzorku. Následně dojde k předběžnému zatížení silou $F_0 = 100$ N, což je výchozí poloha pro měření hloubky vtisku, a potom se pozvolna zvětšuje zatěžovací síla F_1 tak, aby se za 3 - 6 sekund dosáhlo zatížení předepsané normou. Potom se zatěžující síla zmenší na $F_0 = 100$ N a v tomto okamžiku se zjistí přírůstek hloubky h , který nastal oproti výchozí poloze při $F_0 = 100$ N. Zkouška tvrdosti je snadná, rychlá a vpichy jsou velmi malé – maximální hloubka 0,2 mm. Využívá se pro běžnou kontrolu velkých sérií výrobků. [21, 24]

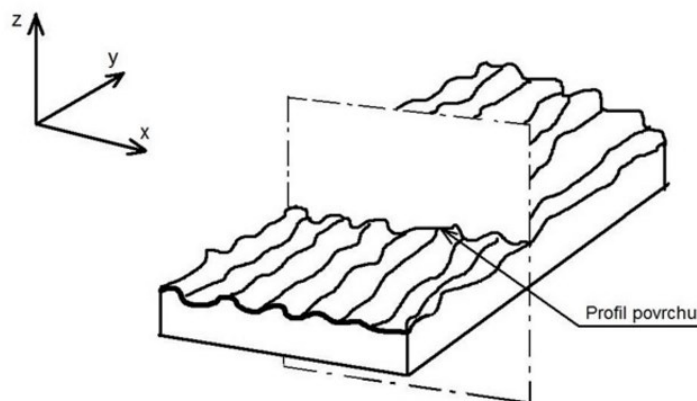


Obr. 3.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella (HRB, HRC) [21]

V technické praxi se pro měření těsnících ucpávek (abradable) využívá metoda HR15Y. Tato metoda využívá jako indentor ocelovou kalenou kuličku o průměru 12,70 mm. Primární zatěžující síla je $F_1 = 147,1 \text{ N}$ (15kgf) a předběžné zatížení je $F_0 = 29,42 \text{ N}$ (3 kgf). Počet měření je dán nástřikovou normou. [25]

3.2 Měření drsnosti povrchu

Drsnost povrchů hraje v technické praxi nezastupitelnou roli. Vyhodnocování drsnosti se provádí různými matematickými postupy a technikami, nicméně často bývá podceňováno a redukováno na nalezení parametru R_a nebo R_z . Základní definice dle ČSN EN ISO 4287 stanovuje, že drsnost je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, jenž nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Na reálném povrchu lze nalézt, jak mikronerovnost, což je drsnost povrchu, která je dána stopami po nástroji nebo brusivu, tak i makronerovnost, což je vlnitost povrchu a je nejčastěji způsobena vibrační soustavou stroj – nástroj – obrobek. U obrobených povrchů se tyto nerovnosti navzájem překrývají a je nutné je rozdělit. [30]



Obr. 3.4 Profil povrchu [30]

Metody měření drsnosti povrchu: [30]

- **kvalitativní** – zakládá se na porovnávání vzorkovnice s reálným povrchem, k čemuž slouží vzorkovnice povrchů nebo komparační mikroskopy,
- **kvantitativní** – jsou to metody parametrické, využívající matematický popis parametrů povrchu. V praxi se využívají profilometry, které dokáží měřit kromě drsnosti i vlnitost a mnohdy i tvar.

4. Experimentální část práce

V experimentální diplomové práci bylo řešeno povrchové zpevnění obráběného žárově stříkaného povrchu. Žárový nástřik byl nanesen na třicet testovacích válečků, které se poté soustružily. Nástřik bylo potřeba soustružit nástroji s odlišným poloměrem zaoblení špičky a předem stanovenými řeznými podmínkami. Dále byla měřena tvrdost nástřiku metodou HR15Y a drsnost nástřiku pomocí optické bezdotykové metody.

4.1 Použité žárově stříkané povlaky

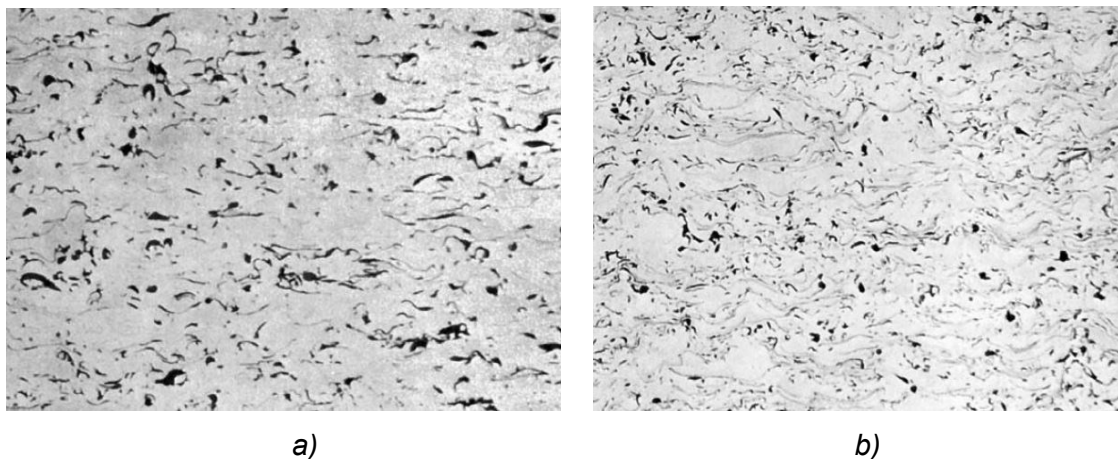
Pro nástřik testovacích válečků byl použit stejný abradable nástřik, se stejným chemickým složením. Tento abradable nástřik vykazuje vyšší pórovitost a plní těsnicí funkci, jak je popsáno v kapitole 1.2. Nástřik byl aplikován pomocí atmosférického plazmového nanášení.

Podkladová vrstva nástřiku (bond coat) Metco 480NS

Metco 480 NS je nikl – hliníkový prášek, který se žárově nanáší metodou HVOF nebo plazmovým nanášením. Využívá se pro zlepšení elektrické vodivosti, tepelné vodivosti, odolnosti proti korozi, oxidaci, opotřebení, a především jako podkladová vrstva pro jiné žárově stříkané povlaky. Nástřik musí být nanesen předem na otryskaný povrch bez známek oxidace a jiného znečištění. Pro natavení materiálu Metco 480 NS plazmovým nástřikem se využívá směs plynů argon – vodík nebo argon – helium. [31]

Tab. 4.1 Charakteristiky nástřiku Metco 480 NS [31]

Chemické složení	95% Ni, 5% Al
Makrotvrdost	Rb 80
Porozita nástřiku	Menší než 0,25 %
Hustota nástřiku	3,5 – 4,5 g/cm ³
Provozní teplota	Menší než 800 °C



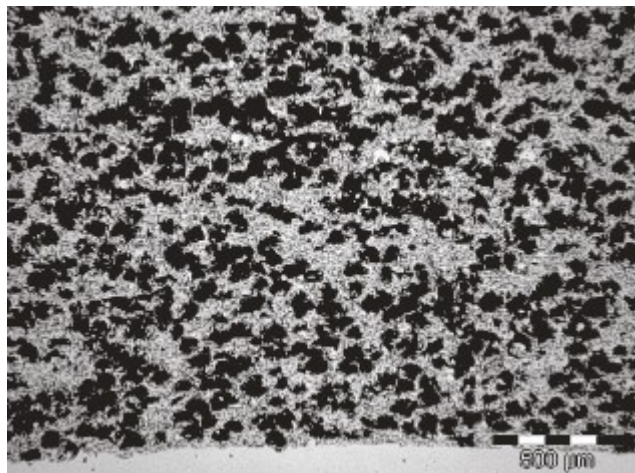
Obr. 4.1 a) Mikrostruktura nástríku naneseného plazmovým hořákem
b) Mikrostruktura nástríku naneseného kyslíko - acetylenovým plamenem [31]

Vrchní abradable vrstva nástríku Metco 2042

Metco 2042 je, CoNiCrAlY - nitrid bóru s příměsí polyesteru. Kompozitní prášek vysušený rozprášením, jenž je určený pro výrobu obrusitelného těsnícího povlaku. Povlak je aplikován do obvodové spáry dílce vysokotlakého kompresoru tryskových motorů a průmyslových plynových turbín, kde může rotační součást přicházet do kontaktu s povlakem. Povlak minimalizuje opotřebení rotujících součástí, a zároveň maximalizuje efektivitu proudu plynu. Zajišťuje lepší odolnost proti oxidaci a korozi ve srovnání s jinými obrusitelnými abradable materiály na bázi nikl – chrom. Složka nitrid boru zajišťuje dobré mazání, čímž zlepšuje obrušovatelnost a snižuje opotřebení ostří během rotace lopatek. Pórovitost povlaku se pohybuje od 35 do 60 % a je řízena množstvím zachyceného polyesteru v nástríku. Po nástríku se doporučuje provést tepelné zpracování, které vede k odstranění polyesterové složky a vytváří vyšší pórovitost ve struktuře povlaku. Povlak lze využít při provozní teplotě do 750 °C, nicméně při teplotě nad 650 °C lze očekávat zvýšenou náchylnost k oxidaci. [31]

Tab. 4.2 Charakteristika nástríku Metco 2042 [31]

Chemické složení	29% Co, 24% Ni, 16% Cr, 6% Al, 0,3% Y, 7% BN, 14% Polyester
Makrotvrdost – HR15Y	58-65
Porezita nástríku	35 - 60 %
Hustota nástríku	3,2 ± 0,2 g/cm ³
Provozní teplota	≤ 750 °C
Rozměr mezery	0,05 – 0,5 mm
Tloušťka nástríku	≈ 3 mm
Technologie nanášení	Nástrík plazmou



Obr. 4.2 Mikrostruktura nástřiku METCO 2042



Obr. 4.3 Testovací váleček s žárovým nástřikem

Vyhodnocení žárového nástřiku

Žárový nástřik, který byl nanesen na testovací vzorek stejnými parametry, jako byl nanesen na testovací válečky určené k obrábění. Vzorek byl po nanesení žárového nástřiku předán do laboratoře k vyhodnocení. Vzorek byl rozřezán v určeném místě, zalit do pryskyřice, vakuován a zaleštěn. Vyhodnocení se provádělo za pomoci etalonu, který je zobrazen na obrázku 4.2. V nástřiku se neobjevily žádné větší póry přesahující normu a mikrostruktura odpovídala etalonu nástřiku. Vzorek byl vyhodnocen jako vyhovující.

4.2 Použité zařízení, přípravy a vzorky

Zařízení pro žárový nástřik

Nástřik reprezentativních vzorků a zkušebních válečků bylo provedeno na zařízení od firmy GTV, typ MF-P 1000. Ve stříkací kabině stroje je usazen průmyslový robot KUKA, KR16 a otočný stůl KDT 300. Zařízení disponuje dvěma technologiemi pro nástřik, a to pro nástřik plamenem (kyslíko – acetylenovým rozvodem) a plazmový nástřik (plyn – Ar, He, H₂).



Obr. 4.4 Zařízení pro žárový nástřik

Zařízení pro měření tvrdosti metodou HR15Y

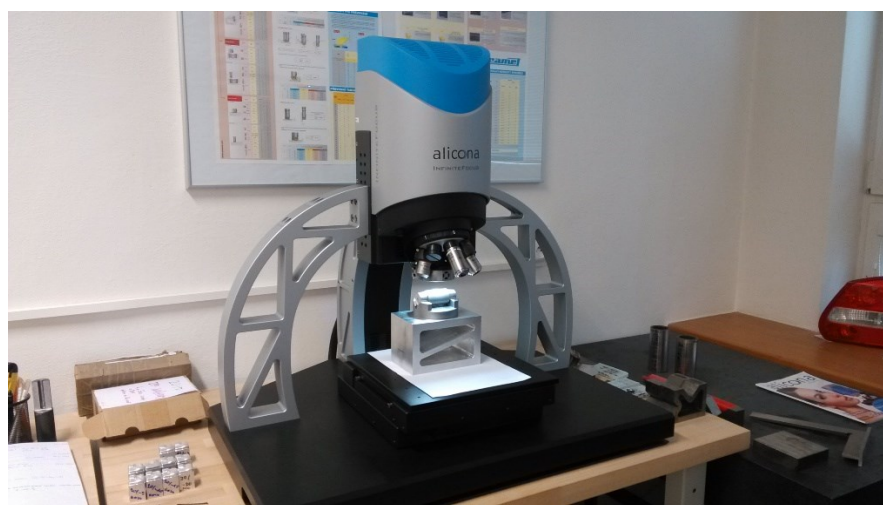
Měření tvrdosti nástřiku bylo prováděno na tvrdoměru značky LECO LR-300TDL, jenž je využíván na standardní měření tvrdosti žárového nástřiku ve společnostech Honeywell. Tvrdoměr využívá kuličkový indentor o průměru 12,7 mm a vyhodnocování se provádí dle metody Rockwella s označením HR15Y. Detailní popis této metody je popsán v kapitole 3.1.



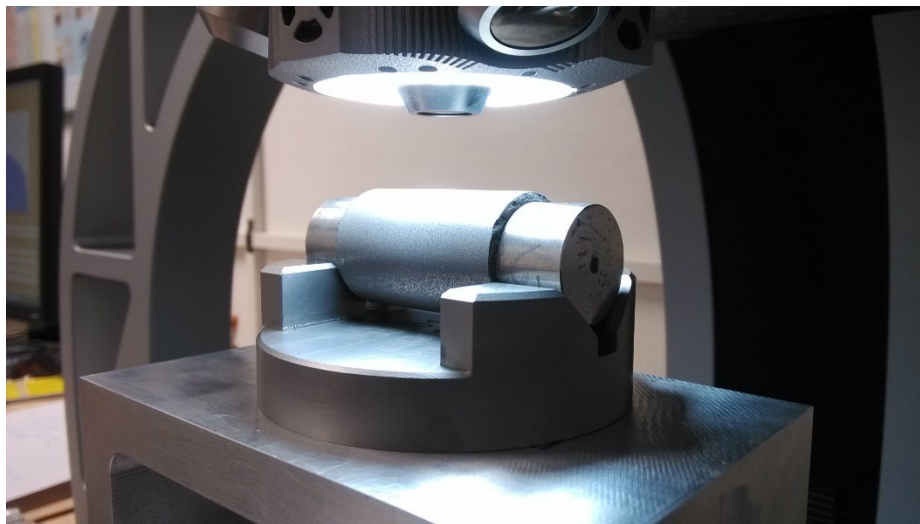
Obr. 4.5 Tvrdoměr LECO

Zařízení pro měření drsnosti nástřiku

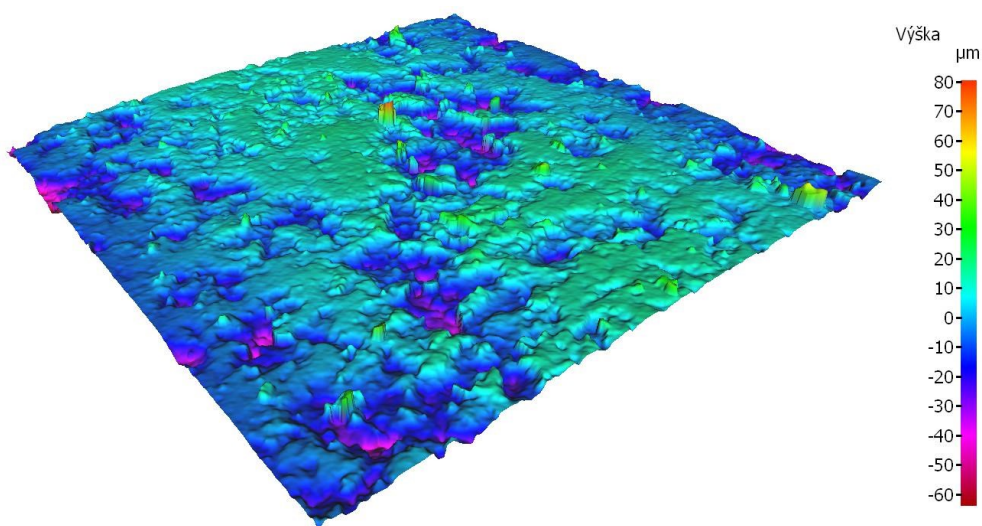
Měření drsnosti nástřiku bylo provedeno bezdotykovou optickou metodou na zařízení Infinite Focus G5 od společnosti Alicona. Toto zařízení neprovádí nejen měření drsnosti povrchu, ale také 3D optické měření s vysokým rozlišením. Rozsah měřitelných ploch je téměř neomezený a je realizováno za pomoci koaxiálního blesku a optimalizovaným prstencovým LED světlem. Přístroj dosahuje měření, jenž kombinují vysoké rozlišení, vysokou opakovatelnost a vysokou přesnost. Všechny povrchové vlastnosti se měří za použití jednoho multifunkčního senzoru měření. Optimální nastavení parametrů měření je automatické, což umožňuje více uživatelům s různými materiály využívat přístroj a systém s jednoduchostí a jistotou.



Obr. 4.6 Alicona Infinite Focus G5



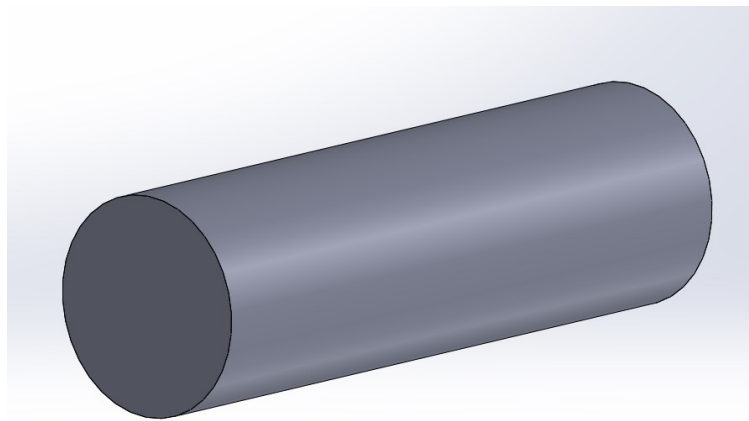
Obr. 4.7 Detail na měřený vzorek



Obr. 4.8 Vygenerovaná struktura povrchu

Testovací válečky

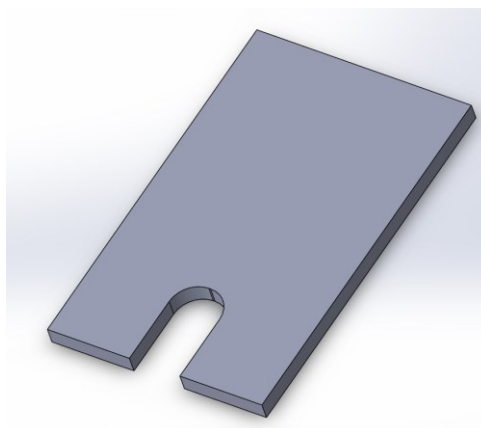
Testovací válečky byly vyrobeny z materiálu HS188 o průměru 1 inch (25,4 mm) a délky 80 mm. Materiál HS188 má vynikající vysokoteplotní pevnost, odolnost vůči vnějšímu prostředí a je vyroben ze slitiny kobalt – nikl – chrom – wolfram. První záměr bylo stříkat kulatinu o délce 0,5 m, a až po-té upíchnout na soustruhu na jednotlivé válečky o délce 80 mm, ale kvůli eliminaci chvění, výkyvu tyčky, či poškození plazmového nástřiku byly testovací válečky stříkány po jednom ve sklíčidle.



Obr. 4.9 Testovací váleček

Zkušební vzorek pro ověření mikrostruktury nástřiku

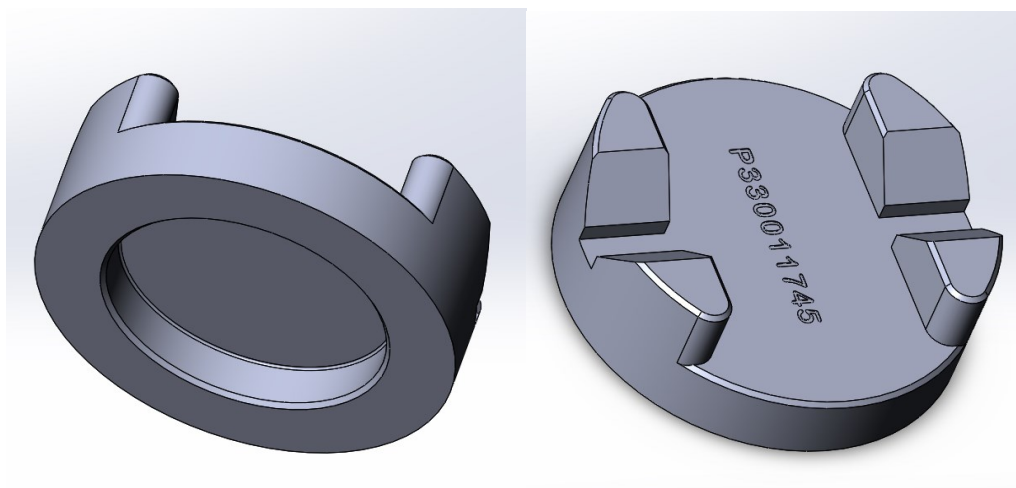
Zkušební vzorek pro ověření mikrostruktury byl vyroben z materiálu HS 188, což je stejný materiál jako testovací válečky. Vzorek byl vystřižen z plechu o tloušťce 1,6 mm a stříkán na testovacím přípravku stejnými parametry jako testovací válečky. Následně byl vzorek předán do metalografické laboratoře k vyhodnocení.



Obr. 4.10 Zkušební vzorek

Přípravek pro měření tvrdosti

Přípravek pro měření tvrdosti byl navržen pro tento experiment tak, aby pevně dosedl na protilehlou plochu od indontoru tvrdoměru. Přípravek byl vyroben z konstrukční oceli. Přípravek může vykazovat mírné prohnutí v průběhu měření, ale díky stejné použité síle při všech měření bude odchylka u všech měření stejná.

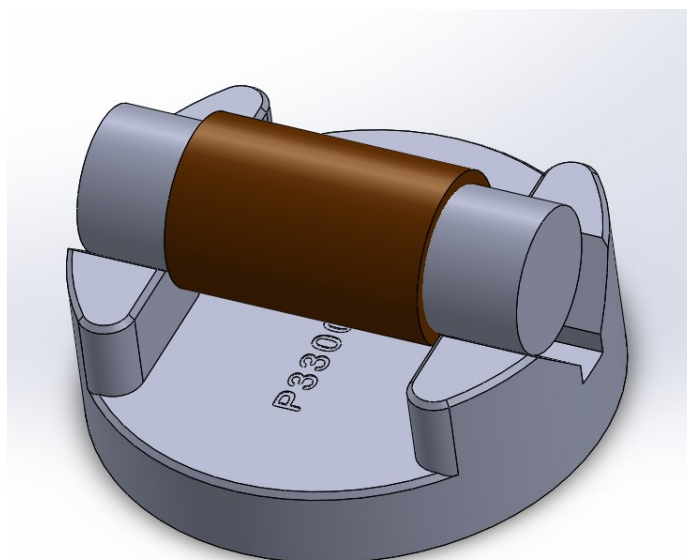


a)

b)

Obr. 4.11 Přípravek pro měření tvrdosti

a) pohled ze spodní části b) pohled z horní části



Obr. 4.12 Testovací přípravek se vzorkem

Obráběcí stroj

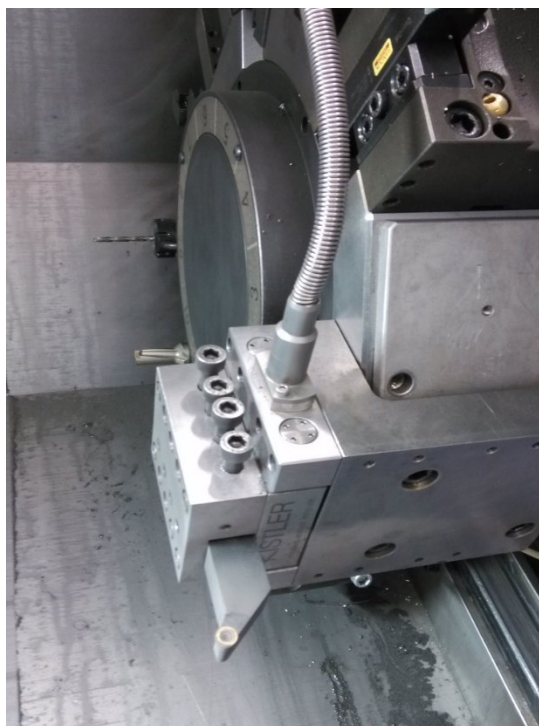
Pro obrobení žárového nástřiku na testovacích válečkách byl využit horizontální CNC soustruh NLX 2500/700 od firmy Mori Seiki. Toto obráběcí centrum splňuje veškeré požadavky pro obrobení žárového nástřiku na testovacích válečkách, jakož je vysoká tuhost, přesnost, vzdálenost mezi středy 700 mm, vestavěný motor v revolverové hlavici atd. [32]



Obr. 4.13 Obráběcí centrum Mori Seiki NLX 2500/700

Dynamometr

V závislosti na rychlosti bylo realizováno měření řezných sil pomocí třísložkového dynamometru Kistler, typ 9129AA spolu s nábojovým zesilovačem Kistler typu 5070. Dynamometr se skládá z tělesa držáků nože, pláště, který se vyznačuje vysokou tuhostí a tenzometrické snímače, jejichž jsou součástí měřících článků. Nožový držák je uložen na osmi snímacích člancích, jenž obsahují deformační tělíska s nalepenými tenzory. Detailnější popis dynamometru je popsán v kapitole 2.1.




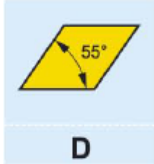
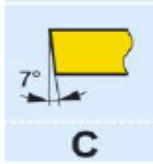
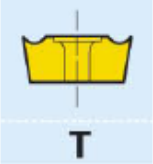
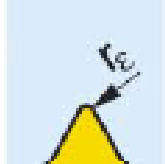
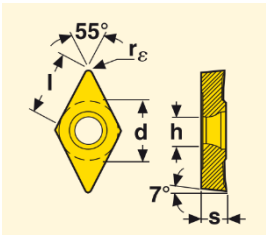
Obr. 4.14 Upnutí soustružnického nože v dynamometru Kistler

4.3 Použité řezné nástroje

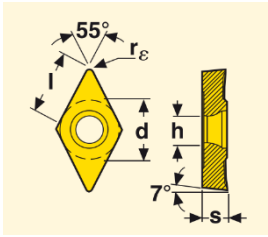
Pro obrábění žárového nástřiku byla využita metoda soustružení vyměnitelnými břitovými destičkami. Pro testy byly využity dva různé druhy vyměnitelných břitových destiček od firmy Seco, s pozitivní geometrií, které se rovněž využívají pro obrábění žárových nástřiků ve společnosti Honeywell. První použitá vyměnitelná břitová destička byla kosočtvercového tvaru s označením DCGT, která nebyla povlakována. Druhou použitou vyměnitelnou destičkou byla destička kruhovitého tvaru s označením RCMT, jenž byla povlakována. Obě tyto destičky jsou určené pro obrábění lehkých kovů, jako je např. hliník a jeho slitiny.

První vyměnitelná destička s označením DCGT a třídou KX, která má kladný úhel hřbetu, patří do optimalizované jemnozrné třídy, jenž je určena pro obrábění např. neželezných kovů a zejména hliníku. Destička byla použita pouze s jedním poloměrem zaoblení špičky 0,4 mm. V tabulkách níže jsou specifikovány hlavní rozměry a tolerance vyměnitelné břitové destičky.

Tab. 4.3 Základní rozměry vyměnitelné břitové destičky DCGT11T304F-AL, KX [32]

Typ vyměnitelné břitové destičky: DCGT11T304F-AL	Tvar destičky	Úhel hřbetu	Provedení	Rádus špičky
				
	55°	7°	T	0,4 [mm]
	d [mm]	l [mm]	s [mm]	h [mm]
	9,525	11,60	3,97	4,4

Tab. 4.4 Tolerance vyměnitelné břitové destičky DCGT 11T3 F – AL, KX [32]



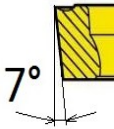


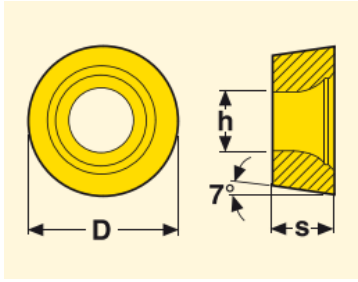
	d [mm]	S [mm]	r _ε [mm]
	±0,025	±0,05	±0,1



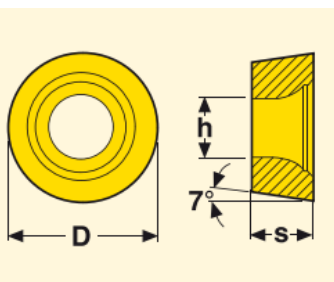
Obr. 4.15 Vyměnitelná břitová destička DCGT

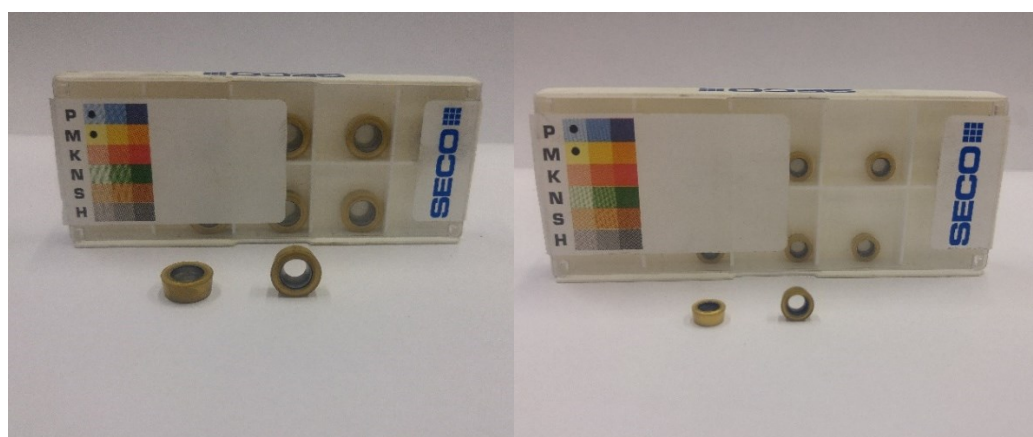
Následné vyměnitelné břitové destičky byly také s pozitivní geometrií břitu a označením RCMT. Tato VBD disponuje kruhovým průřezem, přičemž pro testování byly využity břitové destičky s dvěma poloměry zaoblení špičky. Třída materiálu CP500 je houževnatá jemnozrnná třída vhodná jak pro dokončovací, tak pro středně hrubovací obrábění. Používá se např. pro oceli odolávajících korozi, ale i s širokým použitím na ocelích a hliníkových slitin. Pro obrábění žárového nástřiku byly použity destičky s průměrem 6 a 10 mm. V následujících tabulkách jsou popsány základní rozměry a tolerance pro kruhové vyměnitelné destičky RCMT MO – F1, CP500.

Tab. 4.5 Základní rozměry vyměnitelných kruhových břitových destiček [32]

	<i>Tvar destičky</i>	<i>Úhel hřbetu</i>	<i>Provedení</i>	<i>Rádus špičky</i>
				
RCMT0602M0-F1	$\varnothing 6$ [mm]	7°	T	3 [mm]
RCMT1002M0-F1	$\varnothing 10$ [mm]	7°	T	5 [mm]
	<i>D</i> [mm]	<i>s</i> [mm]	<i>h</i> [mm]	
	RCMT0602M0-F1	6,00	2,38	2,9
	RCMT1002M0-F1	10,00	3,97	4,5

Tab. 4.6 Tolerance vyměnitelných kruhových břitových destiček [32]

	<i>D</i> [mm]	<i>s</i> [mm]
	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$



Obr. 4.16 Vyměnitelné kruhové břitové destičky RCMT

4.4 Volba řezných podmínek

Řezné podmínky jsou jedním z hlavních parametrů technologie obrábění, kde jednotlivými parametry jsou: řezná rychlost v_c , hloubka řezu a_p a posuv f . Při volbě řezných podmínek bylo nutné brát ohled na aktuální řezné podmínky pro abrasivní nástřiky používané ve společnosti Honeywell a samozřejmě i na jeho mechanické vlastnosti. Standardní řezné podmínky byly zvoleny následovně: řezná rychlost $v_c = 250 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$, posuv $f = 0,06 \text{ [mm]}$ a hloubka třísky $a_p = 0,2 \text{ [mm]}$. Následně byla řezná rychlost a posuv jednotlivě zvýšeny a sníženy.

Tab. 4.7 Řezné parametry pro obrábění vzorků.

Parametry	Řezná rychlost [m·min ⁻¹]	Posuv [mm]	Hloubka třísky [mm]
Standartní	250	0,06	0,2
Snížení řezné rychlosti	150	0,06	0,2
Zvýšení řezné rychlosti	350	0,06	0,2
Snížení posuvu	250	0,03	0,2
Zvýšení posuvu	250	0,09	0,2

4.5 Měření tvrdosti nástřiku před obrobením

Měření tvrdosti nástřiku bylo měřeno za účelem zjištění, zda v povrchu nástřiku po obrobení vzniká povrchové zpevnění nebo nikoli. Měření bylo provedeno v metalografické laboratoři přímo ve společnosti Honeywell na zařízení LECO LR-300TDL. Na tvrdoměr byl navržen přípravek, na jejichž prizmatech lze ustavit testovací váleček tak, aby byl v ose s indentorem.



Obr. 4.17 Tvrdoměr s přípravkem pro měření tvrdosti (vlevo), Tvrdoměr s přípravkem a vzorkem (vpravo)



Obr. 4.18 Detaily na vzorek s indentorem

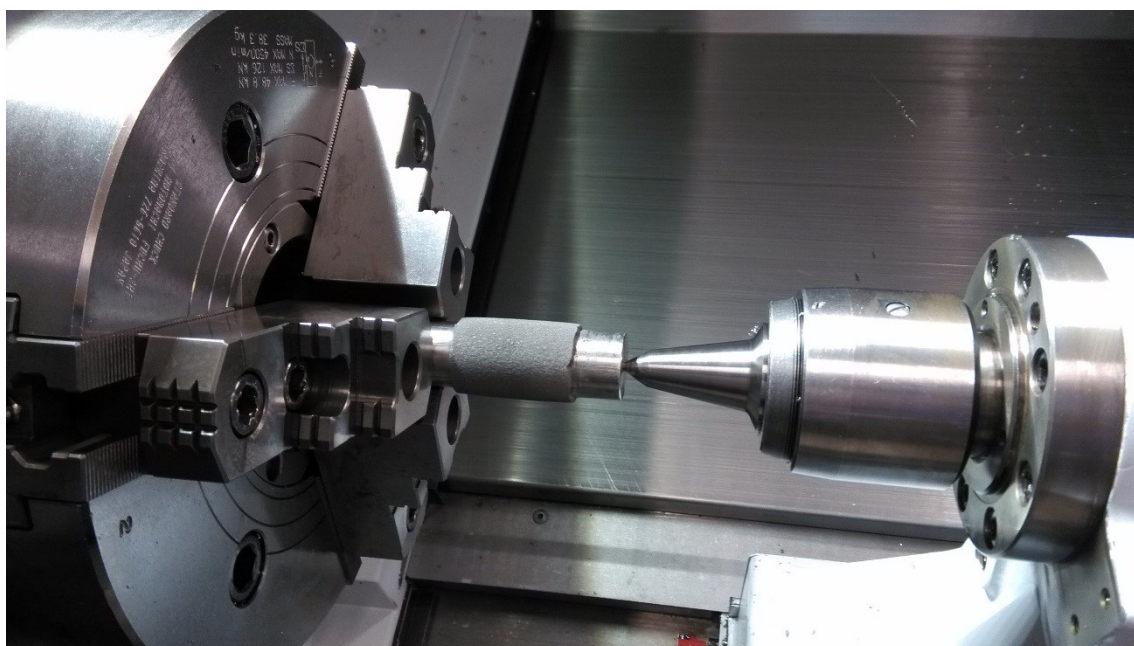
Tab. 4.8 Naměřené hodnoty tvrdosti HR15Y

Pořadí	1. měření HR15Y	2. měření HR15Y	3. měření HR15Y	4. měření HR15Y	5. měření HR15Y	Průměrná hodnota HR15Y
1. vzorek	53,2	71,4	69,2	68,6	58,3	64,14
2. vzorek	76,6	74,9	63,1	62,3	62,3	67,84
3. vzorek	63,7	67,8	70,9	62,3	73,0	67,54
4. vzorek	60,9	65,2	71,5	64,6	60,3	64,50
5. vzorek	59,0	64,3	57,8	71,3	68,5	64,18
6. vzorek	65,8	63,6	63,3	72,8	61,6	65,42
7. vzorek	57,4	71,0	61,3	68,2	64,5	64,48
8. vzorek	73,6	70,8	65,6	64,6	70,3	68,98
9. vzorek	61,6	59,8	67,3	57,5	68,8	63,00
10. vzorek	71,5	72,7	72,5	64,9	70,6	70,44
11. vzorek	56	58,1	59,3	68,5	68,3	62,04
12. vzorek	51,9	71,1	64,1	63,8	73,2	64,82
13. vzorek	63,1	61,5	57,4	70,9	71,4	64,86
14. vzorek	68,1	73	66,1	71,6	74,9	70,74
15. vzorek	67,5	59,2	67,1	57,4	67,9	63,82
16. vzorek	69,1	70,8	74,3	66,9	66,2	69,46
17. vzorek	72,1	62,8	71,4	74,2	70,4	70,18
18. vzorek	66	55,9	68,7	60,8	59,5	62,18
19. vzorek	74,5	70	67,1	67,6	59,7	67,78
20. vzorek	65,6	69,6	68,2	68,5	70,4	68,46

Pořadí	1. měření HR15Y	2. měření HR15Y	3. měření HR15Y	4. měření HR15Y	5. měření HR15Y	Průměrná hodnota HR15Y
21. vzorek	73,7	61,5	74,8	68,9	74,4	70,66
22. vzorek	61,5	67,2	65,1	68	69,6	66,28
23. vzorek	66,3	69	70,7	74,7	69,6	70,06
24. vzorek	69,4	69,6	59,9	66,9	60,8	65,32
25. vzorek	64,5	75,4	69,5	65,5	71,5	69,28
26. vzorek	61	55,3	62,9	64,6	58	60,36
27. vzorek	63	61,9	71,1	70,8	55,6	64,48
28. vzorek	70	76,7	74	69,8	64,4	70,98
29. vzorek	65,1	58,3	64	61,6	70,5	63,9
30. vzorek	74,5	62,4	63,4	59,7	75,1	67,02

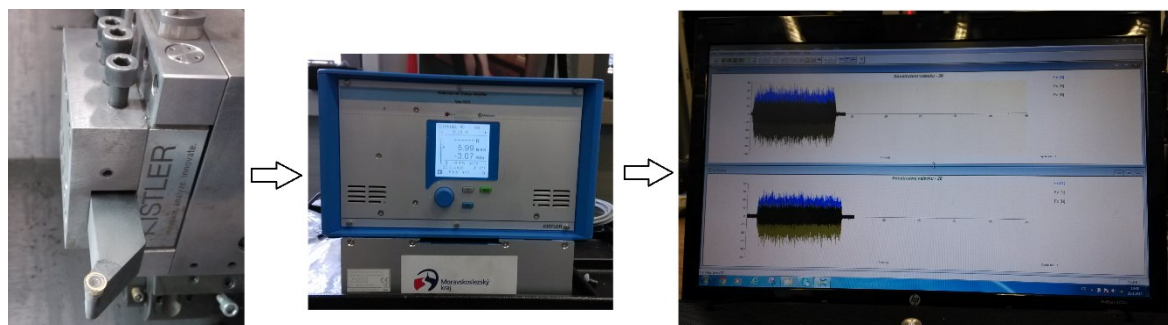
4.6 Obrábění žárového nástřiku

Obrábění žárového nástřiku na testovacích válečkách proběhlo v laboratoři Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Pro tento experiment bylo vyhrazeno soustružnicko frézovací centrum NLX 2500/700 od firmy Mori Seiki, jenž je více popsán v kapitole 4.2. Testování proběhlo na testovacích válečkách, které byly opatřeny abradable nástřikem. Jednotlivými řeznými podmínkami se obráběly dva testovací válečky pro lepší statistický výsledek. Pro experiment nebylo možné použít více válečků s žárovým nástřikem z důvodu omezených nákladů.



Obr. 4.19 Testovací váleček upnutý ve sklíčidle

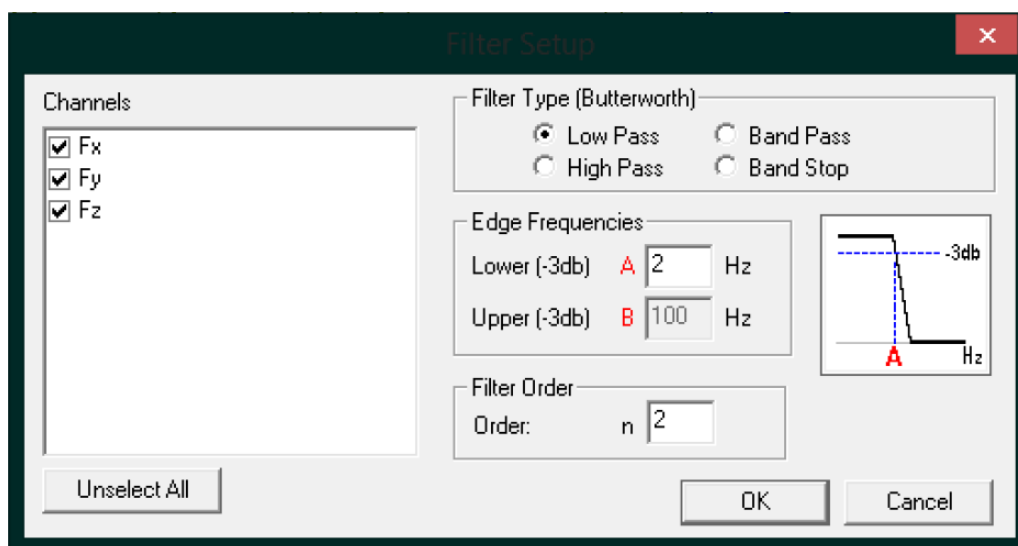
V průběhu obrábění žárového nástřiku danými parametry a zvolenými vyměnitelnými břitovými destičkami, probíhalo měření složek řezných sil pomocí tříložkového stacionárního dynamometru Kistler 9129AA, zesilovače 5070A a počítačového softwaru Dynoware. Za pomoci zmíněného softwaru lze realizovat měření složek řezných sil, které působí na řezný nástroj v průběhu obrábění. Za pomoci počítačové analýzy a získaných hodnot se zobrazily složky řezných sil v podobě grafu.



Obr. 4.20 Propojení dynamometru s počítačovou jednotkou

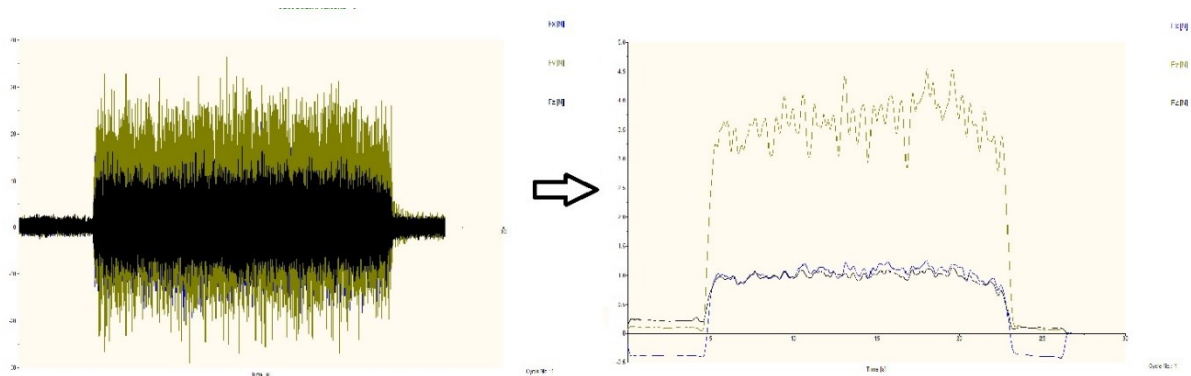
Nastavení softwaru DynoWare

V softwaru DynoWare bylo nezbytné nastavit filtrování tak, aby složky naměřených řezných hodnot byly dostatečně velké. Zapříčiňuje to vysoce porézní struktura abradable povlaku Metco 2042, u něhož bylo nutné odstranit vysoké frekvence kmitání v průběhu obrábění.



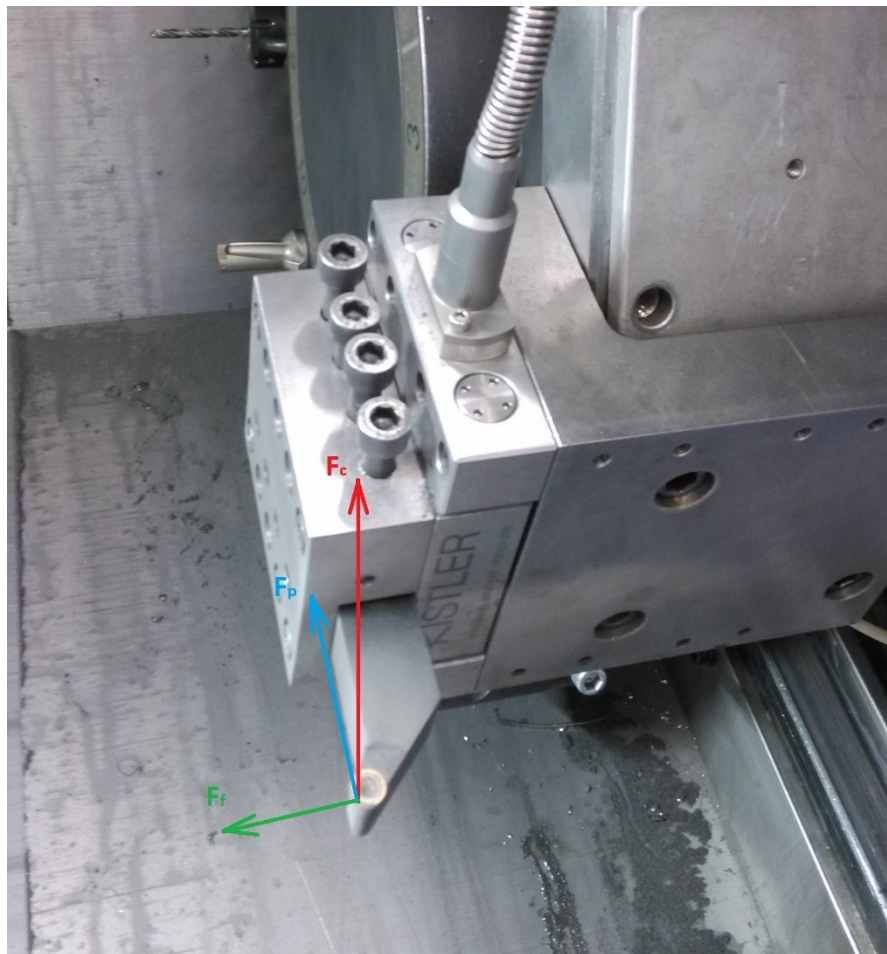
Obr. 4.21 Nastavení filtru v softwaru DynoWare

Na následujícím obrázku 4.18 je zobrazen vygenerovaný graf z průběhu obrábění žárového nástřiku Metco 2042 bez filtrovaných hodnot a následně s filtrovanými hodnotami. Ze zobrazeného grafu lze jednoduše vyčíst velikost řezných složek z průběhu obrábění žárového nástřiku.



Obr. 4.22 Filtrování grafu: nefiltrovaný graf (vlevo), filtrovaný graf (vpravo)

Vzhledem k tomu, že pro obrábění žárového nástřiku byly využity dva typy držáků pro VBD, tak byly různé směry řezné složky síly řezání. Pro VBD DCGT 11T3 F – AL, KX kosočtvercového tvaru odpovídaly jednotlivé složky směru F_x pasivní složce síly řezání F_p , F_y byla řezná složka síly řezání F_c a F_z posuvovou složkou síly řezání F_f . Pro VBD RCMT kruhového tvaru odpovídaly jednotlivé složky směru F_x pasivní složce síly řezání F_p , F_y byla záporná hodnota řezné složky síly řezání F_c a F_z posuvovou složkou síly řezání F_f .

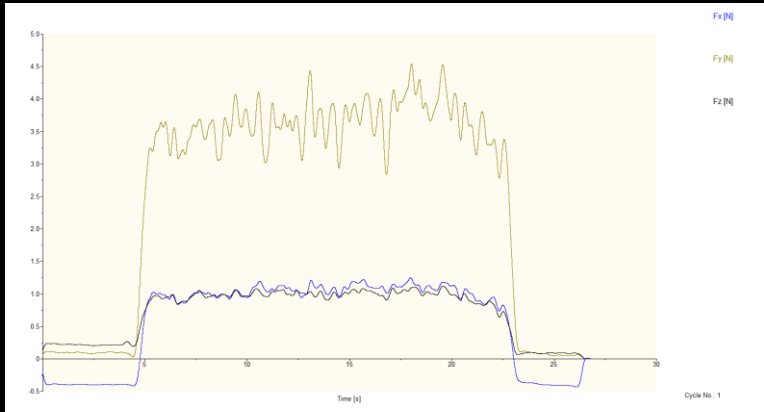



Obr. 4.23 Řezné síly pro VBD RCMT

Vyhodnocení silových poměrů po obrábění a drsnosti nástřiku

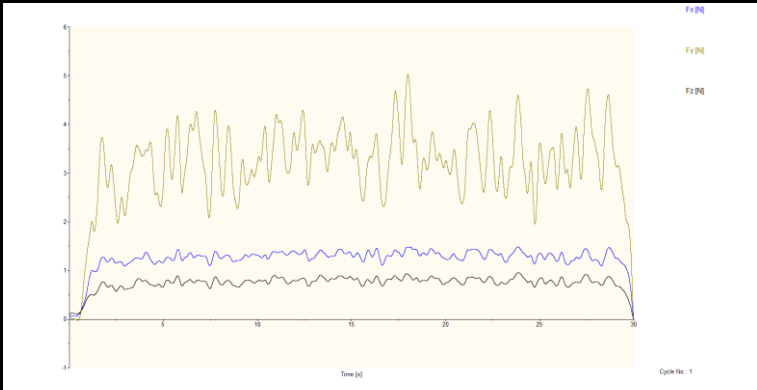

V tabulkách 4.9 až 4.23 jsou uvedeny výsledky z obrábění žárového nástřiku Metco 2042. V tabulkách jsou uvedeny řezné parametry, grafy s filtrovanými hodnotami složek řezných sil. Dále intervaly, ve kterých probíhalo měření a vyhodnocení složek řezných sil. Interval měření byl při ustáleném průběhu měření – bez nájezdu a výjezdu vyměnitelné břitové destičky z obráběného nástřiku. Minimální, maximální a střední hodnoty složek řezných sil, parametry profilu drsnosti žárového nástřiku a na závěr vizualizace obrobeného povrchu a popis obrobeného povrchu.

Tab. 4.9 Průběh měření složek řezných sil při standartních parametrech, vzorek 1, 2

Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	DCGT11T304F-AL	0,4 mm
				Střední aritmetická odchylka profilu
				Ra = 7,54 μm
				Střední kvadratická odchylka profilu
				Rq = 10,11 μm
				Celková hloubka profilu
				Rt = 86,54 μm
Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů			Rz = 58,48 μm	
Mezní vlnová délka			Lc = 2500 μm	
	Minimální hodnota [N]	F _f = 0,84	F _c = 2,83	F _p = 0,88
	Maximální hodnota [N]	F _f = 1,12	F _c = 4,54	F _p = 1,24
	Střední hodnota [N]	F _f = 1,06	F _c = 3,70	F _p = 1,00
	Vizuální kontrola	Na povrchu nástřiku nejsou vidět stopy po nástroji ani vytrhané části. Obráběný povrch je vyhovující.		

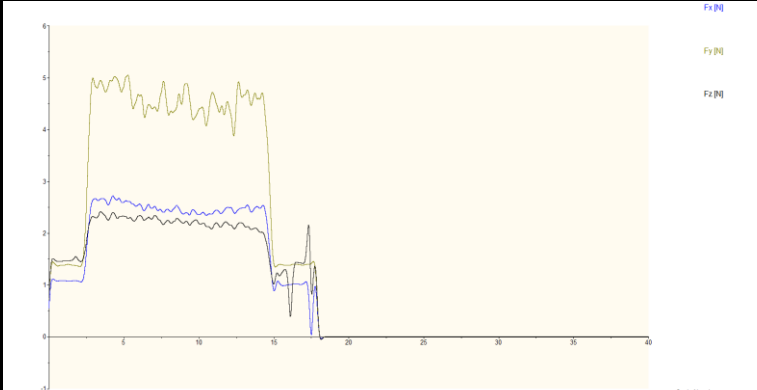

Tab. 4.10 Průběh měření složek řezných sil při snížené řezné rychlosti, vzorek 3, 4

Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
150 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	DCGT11T304F-AL	0,4 mm

	Střední aritmetická odchylka profilu			
	Ra = 10,29 μm			
	Střední kvadratická odchylka profilu			
	Rq = 13,77 μm			
	Celková hloubka profilu			
				Rt = 94,32 μm
Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů			Rz = 73,96 μm	
Mezní vlnová délka			Lc = 2500 μm	
	Minimální hodnota [N]	F _f = 0,57	F _c = 1,94	F _p = 1,09
	Maximální hodnota [N]	F _f = 0,95	F _c = 5,01	F _p = 1,48
	Střední hodnota [N]	F _f = 0,78	F _c = 3,31	F _p = 1,29
	Vizuální kontrola	Na povrchu nástřiku nejsou vidět stopy po nástroji ani vytrhané části. Obráběný povrch je vyhovující.		

Tab. 4.11 Průběh měření složek řezných sil při zvýšené řezné rychlosti, vzorek 5, 6

Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
350 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	DCGT11T304F-AL	0,4 mm

	Střední aritmetická odchylka profilu			
	Ra = 4,97 μm			
	Střední kvadratická odchylka profilu			
	Rq = 6,78 μm			
	Celková hloubka profilu			
				Rt = 52,31 μm
Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů			Rz = 42,09 μm	
Mezní vlnová délka			Lc = 2500 μm	
	Minimální hodnota [N]	F _f = 2,01	F _c = 3,87	F _p = 2,34
	Maximální hodnota [N]	F _f = 2,41	F _c = 5,04	F _p = 2,79
	Střední hodnota [N]	F _f = 2,22	F _c = 4,58	F _p = 2,49
	Vizuální kontrola	Na povrchu nástřiku nejsou vidět stopy po nástroji ani vytrhané části. Obráběný povrch je vyhovující.		

Tab. 4.12 Průběh měření složek řezných sil při sníženém posuvu, vzorek 7, 8

Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,03 mm	0,2 mm	DCGT11T304F-AL	0,4 mm

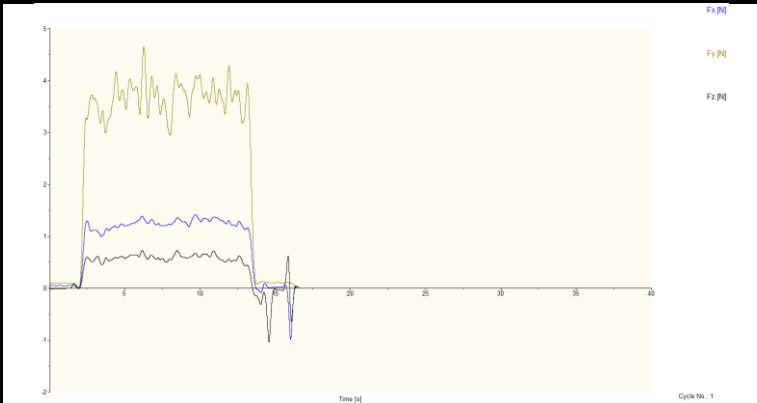
<p>Time [s]</p> <p>Cycle No.: 1</p>	Střední aritmetická odchylka profilu
	Ra = 5,22 μm
	Střední kvadratická odchylka profilu
	Rq = 6,61 μm
	Celková hloubka profilu
Rt = 57,46 μm	

Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů	Rz = 40,82 μm
Mezní vlnová délka	Lc = 2500 μm


	Minimální hodnota [N]	F _f = 0,44	F _c = 1,93	F _p = 0,91
	Maximální hodnota [N]	F _f = 0,72	F _c = 2,78	F _p = 1,30
	Střední hodnota [N]	F _f = 0,58	F _c = 2,37	F _p = 1,06
	Vizuální kontrola	Na povrchu nástřiku nejsou vidět stopy po nástroji ani vytrhané části. Obráběný povrch je vyhovující.		

Tab. 4.13 Průběh měření složek řezných sil při zvýšeném posuvu, vzorek 9, 10

Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,09 mm	0,2 mm	DCGT11T304F-AL	0,4 mm

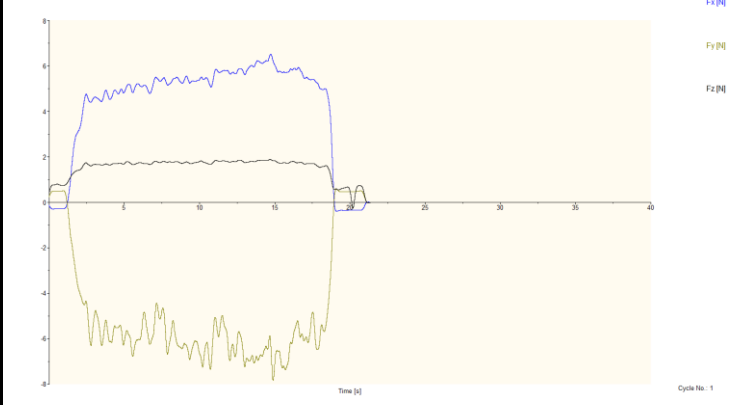

	Střední aritmetická odchylka profilu
	Ra = 6,67 μm
	Střední kvadratická odchylka profilu
	Rq = 8,46 μm
	Celková hloubka profilu
	Rt = 55,85 μm

Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů	Rz = 46,65 μm
Mezní vlnová délka	Lc = 2500 μm

	Minimální hodnota [N]	F _f = 0,45	F _c = 2,94	F _p = 0,99
	Maximální hodnota [N]	F _f = 0,72	F _c = 4,64	F _p = 1,41
	Střední hodnota [N]	F _f = 0,58	F _c = 3,68	F _p = 1,24
	Vizuální kontrola	Na povrchu nástřiku nejsou vidět stopy po nástroji ani vytrhané části. Obráběný povrch je vyhovující.		

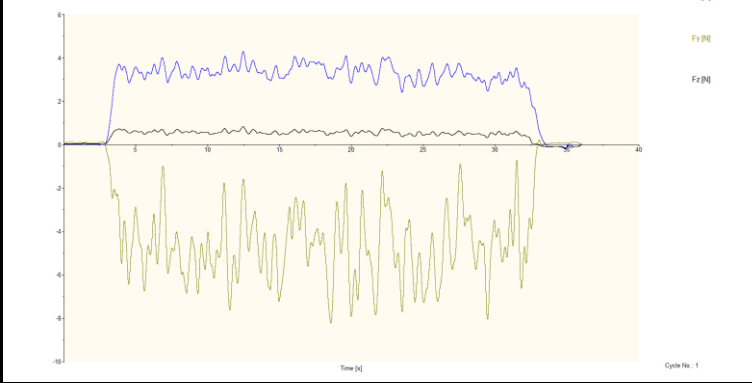

Tab. 4.14 Průběh měření složek řezných sil při standartních parametrech, vzorek 11, 12

Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	RCMT0602M0-F1	3 mm

	Střední aritmetická odchylka profilu			
	Ra = 6,30 μm			
	Střední kvadratická odchylka profilu			
	Rq = 8,95 μm			
	Celková hloubka profilu			
	Rt = 82,97 μm			
Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů			Rz = 66,05 μm	
Mezní vlnová délka			Lc = 2500 μm	
	Minimální hodnota [N]	F _f = 1,59	F _c = 4,43	F _p = 4,39
	Maximální hodnota [N]	F _f = 1,88	F _c = 7,83	F _p = 6,51
	Střední hodnota [N]	F _f = 1,74	F _c = 6,08	F _p = 5,42
	Vizuální kontrola	Na povrchu nástřiku nejsou vidět stopy po nástroji ani vytrhané části. Obráběný povrch je vyhovující.		

Tab. 4.15 Průběh měření složek řezných sil při snížené řezné rychlosti, vzorek 13, 14

Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
150 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	RCMT0602M0-F1	3 mm

	Střední aritmetická odchylka profilu			
	Ra = 5,67 μm			
	Střední kvadratická odchylka profilu			
	Rq = 9,29 μm			
	Celková hloubka profilu			
	Rt = 115,91 μm			
Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů			Rz = 65,45 μm	
Mezní vlnová délka			Lc = 2500 μm	
	Minimální hodnota [N]	F _f = 0,31	F _c = 0,74	F _p = 2,40
	Maximální hodnota [N]	F _f = 0,83	F _c = 8,21	F _p = 4,28
	Střední hodnota [N]	F _f = 0,55	F _c = 4,76	F _p = 3,34
	Vizuální kontrola	Na povrchu nástřiku nejsou vidět stopy po nástroji ani vytrhané části. Obráběný povrch je vyhovující.		

Tab. 4.16 Průběh měření složek řezných sil při zvýšené řezné rychlosti, vzorek 15, 16

Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
350 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	RCMT0602M0-F1	3 mm

<p>Time [s]</p> <p>Cycle No.: 1</p>	Střední aritmetická odchylka profilu			
	Ra = 7,02 μm			
	Střední kvadratická odchylka profilu			
	Rq = 9,32 μm			
	Celková hloubka profilu			
Rt = 62,60 μm				

Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů	Rz = 51,01 μm		
Mezní vlnová délka	Lc = 2500 μm		

	Minimální hodnota [N]	F _f = - 0,81	F _c = 6,12	F _p = 6,54
	Maximální hodnota [N]	F _f = - 0,02	F _c = 9,36	F _p = 10,45
	Střední hodnota [N]	F _f = - 0,44	F _c = 7,76	F _p = 8,52
	Vizuální kontrola	Na povrchu nástřiku nejsou vidět stopy po nástroji ani vytrhané části. Obráběný povrch je vyhovující.		

Tab. 4.17 Průběh měření složek řezných sil při sníženém posuvu, vzorek 17, 18

Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,03 mm	0,2 mm	RCMT0602M0-F1	3 mm

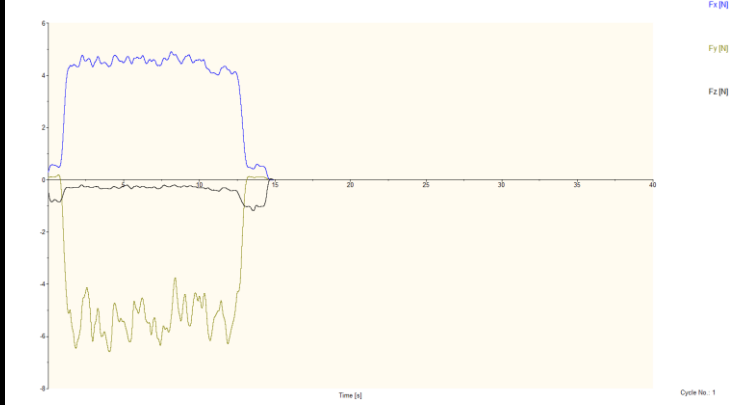
<div><div>Fx [N]</div><div>Fy [N]</div><div>Fz [N]</div></div> <div>Time [s]</div> <div>Opětka No. 1</div>	Střední aritmetická odchylka profilu			
	Ra = 7,58 μm			
	Střední kvadratická odchylka profilu			
	Rq = 11,04 μm			
	Celková hloubka profilu			
Rt = 93,01 μm				

Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů	Rz = 62,98 μm		
Mezní vlnová délka	Lc = 2500 μm		


	Minimální hodnota [N]	F _f = - 1,05	F _c = 4,30	F _p = 5,10
	Maximální hodnota [N]	F _f = - 0,46	F _c = 7,25	F _p = 7,63
	Střední hodnota [N]	F _f = - 0,70	F _c = 5,68	F _p = 6,58
	Vizuální kontrola	Na povrchu nástřiku nejsou vidět stopy po nástroji ani vytrhané části. Obráběný povrch je vyhovující.		

Tab. 4.18 Průběh měření složek řezných sil při zvýšeném posuvu, vzorek 19, 20

Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,09 mm	0,2 mm	RCMT0602M0-F1	3 mm

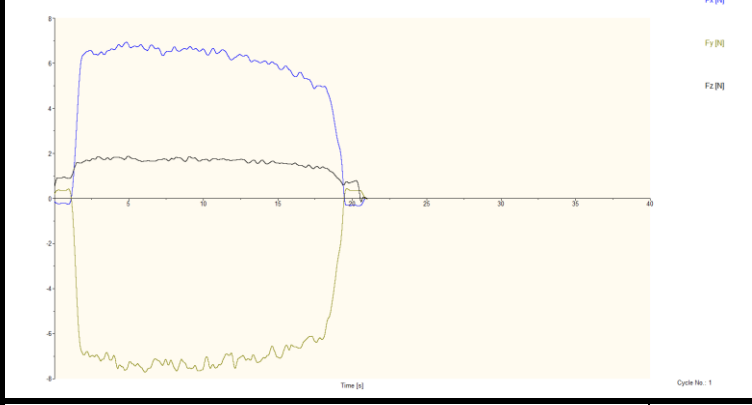
	Střední aritmetická odchylka profilu
	Ra = 6,69 μm
	Střední kvadratická odchylka profilu
	Rq = 8,83 μm
	Celková hloubka profilu
	Rt = 65,08 μm

Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů	Rz = 51,75 μm
Mezní vlnová délka	Lc = 2500 μm


	Minimální hodnota [N]	F _f = - 0,44	F _c = 3,74	F _p = 4,01
	Maximální hodnota [N]	F _f = - 0,20	F _c = 6,58	F _p = 4,90
	Střední hodnota [N]	F _f = - 0,29	F _c = 5,30	F _p = 4,51
	Vizuální kontrola	Na povrchu nástřiku nejsou vidět stopy po nástroji ani vytrhané části. Obráběný povrch je vyhovující.		

Tab. 4.19 Průběh měření složek řezných sil při standartních parametrech, vzorek 21, 22

Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	RCMT1002M0-F1	5 mm

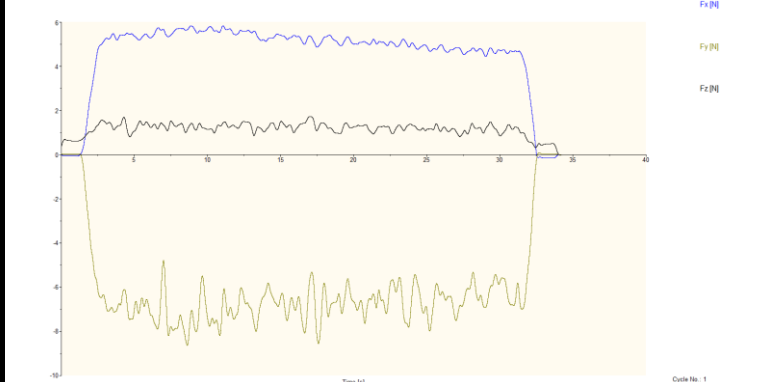
	Střední aritmetická odchylka profilu
	Ra = 4,99 μm
	Střední kvadratická odchylka profilu
	Rq = 6,91 μm
	Celková hloubka profilu
	Rt = 58,44 μm

Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů	Rz = 44,36 μm
Mezní vlnová délka	Lc = 2500 μm


	Minimální hodnota [N]	F _f = 1,32	F _c = 6,11	F _p = 4,87
	Maximální hodnota [N]	F _f = 1,88	F _c = 7,71	F _p = 6,93
	Střední hodnota [N]	F _f = 1,67	F _c = 7,12	F _p = 6,32
	Vizuální kontrola	Na povrchu nástřiku nejsou vidět stopy po nástroji ani vytrhané části. Obráběný povrch je vyhovující.		

Tab. 4.20 Průběh měření složek řezných sil při snížené řezné rychlosti, vzorek 23, 24

Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
150 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	RCMT1002M0-F1	5 mm


	Střední aritmetická odchylka profilu			
	Ra = 6,24 μm			
	Střední kvadratická odchylka profilu			
	Rq = 8,84 μm			
	Celková hloubka profilu			
Rt = 74,65 μm				

Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů	Rz = 49,68 μm		
Mezní vlnová délka	Lc = 2500 μm		


	Minimální hodnota [N]	F _f = 0,80	F _c = 4,79	F _p = 4,43
	Maximální hodnota [N]	F _f = 1,72	F _c = 8,63	F _p = 5,84
	Střední hodnota [N]	F _f = 1,24	F _c = 6,77	F _p = 5,19
	Vizuální kontrola	Na povrchu nástřiku nejsou vidět stopy po nástroji ani vytrhané části. Obráběný povrch je vyhovující.		

Tab. 4.21 Průběh měření složek řezných sil při zvýšené řezné rychlosti, vzorek 25, 26

Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
350 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	RCMT1002M0-F1	5 mm

	Střední aritmetická odchylka profilu			
	Ra = 4,58 μm			
	Střední kvadratická odchylka profilu			
	Rq = 7,05 μm			
	Celková hloubka profilu			
Rt = 84,79 μm				

Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů	Rz = 52,70 μm		
Mezní vlnová délka	Lc = 2500 μm		

	Minimální hodnota [N]	F _f = - 0,91	F _c = 5,46	F _p = 7,71
	Maximální hodnota [N]	F _f = 0,19	F _c = 7,74	F _p = 10,84
	Střední hodnota [N]	F _f = - 0,45	F _c = 6,89	F _p = 9,65
	Vizuální kontrola	Na povrchu nástřiku nejsou vidět stopy po nástroji ani vytrhané části. Obráběný povrch je vyhovující.		

Tab. 4.22 Průběh měření složek řezných sil při sníženém posuvu, vzorek 27, 28

Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,03 mm	0,2 mm	RCMT1002M0-F1	5 mm

<p>Time [s]</p> <p>Cycle No. 1</p>	Střední aritmetická odchylka profilu
	Ra = 4,36 μm
	Střední kvadratická odchylka profilu
	Rq = 6,51 μm
	Celková hloubka profilu
Rt = 84,62 μm	

Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů	Rz = 44,75 μm
Mezní vlnová délka	Lc = 2500 μm

	Minimální hodnota [N]	F _f = 1,37	F _c = 6,12	F _p = 6,44
	Maximální hodnota [N]	F _f = 1,81	F _c = 7,66	F _p = 8,77
	Střední hodnota [N]	F _f = 1,59	F _c = 6,83	F _p = 7,41
	Vizuální kontrola	Na povrchu nástřiku nejsou vidět stopy po nástroji ani vytrhané části. Obráběný povrch je vyhovující.		

Tab. 4.23 Průběh měření složek řezných sil při zvýšeném posuvu, vzorek 29, 30

Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,09 mm	0,2 mm	RCMT1002M0-F1	5 mm

<p>Time [s]</p> <p>Cycle No.: 1</p>	Střední aritmetická odchylka profilu
	Ra = 8,23 μm
	Střední kvadratická odchylka profilu
	Rq = 10,48 μm
	Celková hloubka profilu
Rt = 78,41 μm	

Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů	Rz = 56,91 μm
Mezní vlnová délka	Lc = 2500 μm

	Minimální hodnota [N]	F _f = 0,48	F _c = 6,34	F _p = 5,47
	Maximální hodnota [N]	F _f = 0,80	F _c = 7,65	F _p = 6,38
	Střední hodnota [N]	F _f = 0,65	F _c = 6,85	F _p = 5,89
	Vizuální kontrola	Na povrchu nástřiku nejsou vidět stopy po nástroji ani vytrhané části. Obráběný povrch je vyhovující.		

Zpracování naměřených hodnot

Po naměření hodnot složek řezných sil F_c , F_f a F_p z průběhu obrábění byly vypočteny výsledné síly řezání F pro každou vyměnitelnou břitovou destičku s různými řeznými parametry. Výsledné řezné síly byly statisticky zpracovány dle následujících vztahů z naměřených hodnot.

Výběrový průměr z naměřených hodnot [33]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad 4.6.1$$

Výběrová směrodatná odchylka [33]:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad 4.6.2$$

Směrodatná odchylka aritmetického průměru [33]:

$$u_A = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad 4.6.3$$

Rozšířená nejistota [33]:

$$U = k_U \cdot u_A \quad 4.6.4$$

Pravděpodobnost pokrytí $p = 95 \%$ a pro stanovení rozšířené nejistoty byl využit koeficient rozšíření $k_U = 2$.

Pro celkovou sílu řezání byl výpočet celkové směrodatné odchylky následovný [33]:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} = (\bar{F} \pm U) \quad [\text{N}] \quad 4.6.5$$

$$\frac{\partial F}{\partial F_c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} \cdot 2F_c = \frac{F_c}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} = \frac{F_c}{F} \quad 4.6.6$$

$$\frac{\partial F}{\partial F_f} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} \cdot 2F_f = \frac{F_f}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} = \frac{F_f}{F} \quad 4.6.7$$

$$\frac{\partial F}{\partial F_p} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} \cdot 2F_p = \frac{F_p}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} = \frac{F_p}{F} \quad 4.6.8$$

$$S_{(F)} = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial F_c} \cdot S_{(F_c)}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial F_f} \cdot S_{(F_f)}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial F_p} \cdot S_{(F_p)}\right)^2} \quad 4.6.9$$

V tabulkách 4.24 až 4.26 jsou zapsány průměrné hodnoty složek řezných sil. Jednotlivé vypočtené hodnoty ze statistického zpracování dat, jako jsou rozšířené nejistoty, výběrové směrodatné odchylky a směrodatné odchylky aritmetického průměru. Tyto hodnoty byly nutné pro výpočet výsledných sil řezání F pro jednotlivé řezné síly a každou vyměnitelnou břitovou destičku.

Tab. 4.24 Statistické zpracování hodnot silového zatížení pro VBD DCGT11T304F-AL

Typ VBD		DCGT11T304F-AL		Hloubka třísky		0,2 mm	
Řezná rychlost		Posuv		Poloměr špičky		Počet zpracovaných hodnot	
250 m·min ⁻¹		0,06 mm		0,4 mm		701	
F _f [N]	Σ = 704,48	F̄ = 1,01	s(F) = 0,04	u _A = 0,001		U = 0,01	
	F _f = (1,01 ± 0,01) N						
F _c [N]	Σ = 2600,78	F̄ = 3,71	s(F) = 0,32	u _A = 0,012		U = 0,02	
	F _c = (3,71 ± 0,02) N						
F _p [N]	Σ = 749,82	F̄ = 1,06	s(F) = 0,0765	u _A = 0,007		U = 0,01	
	F _p = (1,07 ± 0,01) N						
F = (3,99 ± 0,03) N							
Řezná rychlost		Posuv		Poloměr špičky		Počet zpracovaných hodnot	
150 m·min ⁻¹		0,06 mm		0,4 mm		1226	
F _f [N]	Σ = 958,06	F̄ = 0,78	s(F) = 0,20	u _A = 0,007		U = 0,02	
	F _f = 0,78 ± 0,02						
F _c [N]	Σ = 4044,86	F̄ = 3,29	s(F) = 1,59	u _A = 0,060		U = 0,12	
	F _c = 3,29 ± 0,12						
F _p [N]	Σ = 1593,92	F̄ = 1,30	s(F) = 0,27	u _A = 0,010		U = 0,02	
	F _p = 1,30 ± 0,02						
F = (3,63 ± 0,17) N							
Řezná rychlost		Posuv		Poloměr špičky		Počet zpracovaných hodnot	
350 m·min ⁻¹		0,06 mm		0,4 mm		251	
F _f [N]	Σ = 552,98	F̄ = 2,20	s(F) = 0,46	u _A = 0,017		U = 0,02	
	F _f = 2,20 ± 0,02						
F _c [N]	Σ = 1123,19	F̄ = 4,47	s(F) = 1,14	u _A = 0,043		U = 0,09	
	F _c = 4,47 ± 0,09						
F _p [N]	Σ = 608,21	F̄ = 2,42	s(F) = 0,23	u _A = 0,009		U = 0,02	
	F _p = 2,4232 ± 0,0181						
F = (5,5453 ± 0,1393) N							
Řezná rychlost		Posuv		Poloměr špičky		Počet zpracovaných hodnot	
250 m·min ⁻¹		0,03 mm		0,4 mm		1301	
F _f [N]	Σ = 758,49	F̄ = 0,58	s(F) = 0,16	u _A = 0,006		U = 0,01	
	F _f = 0,58 ± 0,01						
F _c [N]	Σ = 3094,65	F̄ = 2,37	s(F) = 1,06	u _A = 0,040		U = 0,08	
	F _c = 2,37 ± 0,08						

Řezná rychlost		Posuv	Poloměr špičky	Počet zpracovaných hodnot	
250 m·min ⁻¹		0,03 mm	0,4 mm	1301	
F _p [N]	Σ = 1381,79	F̄ = 1,06	s(F) = 0,22	u _A = 0,008	U = 0,02
	F _p = 1,06 ± 0,0165				
F = (2,66 ± 0,11) N					
Řezná rychlost		Posuv	Poloměr špičky	Počet zpracovaných hodnot	
250 m·min ⁻¹		0,09 mm	0,4 mm	456	
F _f [N]	Σ = 272,09	F̄ = 0,59	s(F) = 0,24	u _A = 0,009	U = 0,02
	F _f = 0,59 ± 0,02				
F _c [N]	Σ = 1696,76	F̄ = 3,72	s(F) = 1,75	u _A = 0,066	U = 0,13
	F _c = 3,72 ± 0,13				
F _p [N]	Σ = 574,92	F̄ = 1,26	s(F) = 0,26	u _A = 0,010	U = 0,02
	F _p = 1,26 ± 0,02				
F = (3,97 ± 0,17) N					

Tab. 4.25 Statistické zpracování hodnot silového zatížení pro VBD RCMT0602M0-F1

Typ VBD		RCMT0602M0-F1		Hloubka třísky		0,2 mm	
Řezná rychlost		Posuv		Poloměr špičky		Počet zpracovaných hodnot	
250 m·min ⁻¹		0,06 mm		3 mm		726	
F _f [N]	Σ = 1271,59	F̄ = 1,75	s(F) = 0,30		u _A = 0,011	U = 0,02	
	F _f = (1,75 ± 0,02) N						
F _c [N]	Σ = 4437,29	F̄ = 6,11	s(F) = 4,30		u _A = 0,162	U = 0,33	
	F _c = (6,11 ± 0,33) N						
F _p [N]	Σ = 3954,69	F̄ = 5,44	s(F) = 1,09		u _A = 0,041	U = 0,08	
	F _p = (5,44 ± 0,08) N						
F = (8,37 ± 0,43) N							
Řezná rychlost		Posuv		Poloměr špičky		Počet zpracovaných hodnot	
150 m·min ⁻¹		0,06 mm		3mm		1301	
F _f [N]	Σ = 714,01	F̄ = 0,54	s(F) = 0,21		u _A = 0,007	U = 0,02	
	F _f = 0,54 ± 0,02						
F _c [N]	Σ = 6244,01	F̄ = 4,79	s(F) = 3,34		u _A = 0,126	U = 0,25	
	F _c = 4,79 ± 0,25						
F _p [N]	Σ = 4355,38	F̄ = 3,34	s(F) = 0,77		u _A = 0,029	U = 0,06	
	F _p = 3,34 ± 0,06						
F = (5,87 ± 0,32) N							
Řezná rychlost		Posuv		Poloměr špičky		Počet zpracovaných hodnot	
350 m·min ⁻¹		0,06 mm		3 mm		501	
F _f [N]	Σ = -218,59	F̄ = -0,43	s(F) = 0,68		u _A = 0,025	U = 0,05	
	F _f = -0,43 ± 0,05						
F _c [N]	Σ = 3916,55	F̄ = 7,81	s(F) = 3,48		u _A = 0,131	U = 0,26	
	F _c = 7,81 ± 0,26						

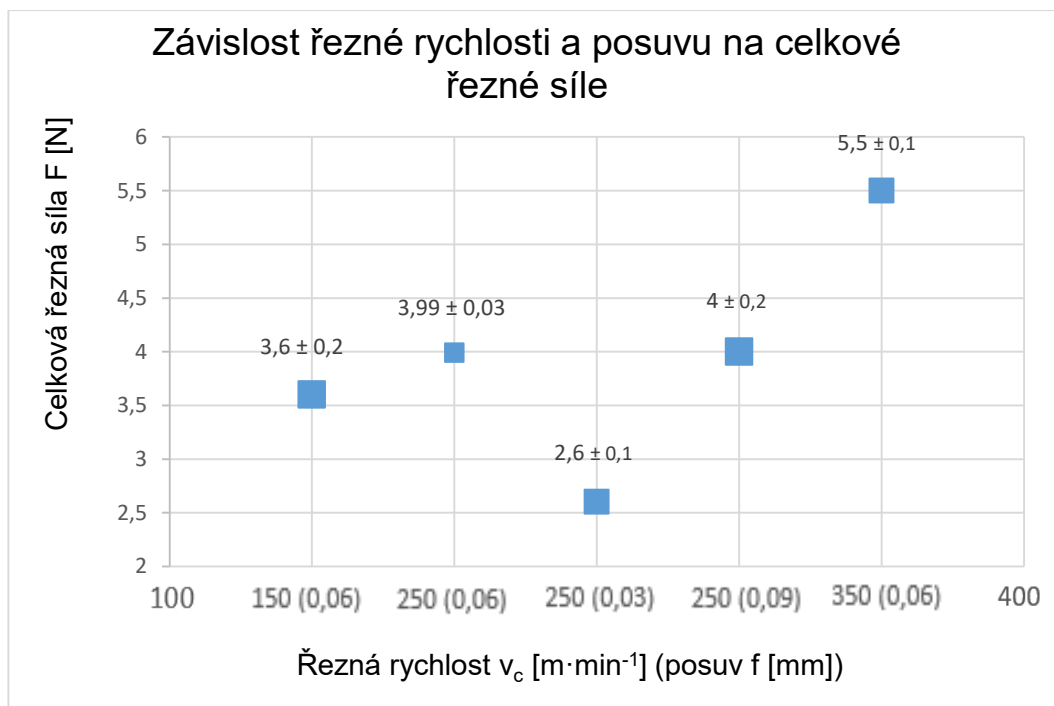
Řezná rychlost		Posuv	Poloměr špičky	Počet zpracovaných hodnot	
350 m·min ⁻¹		0,06 mm	3 mm	501	
F _p [N]	Σ = 4300,73	F̄ = 8,58	s(F) = 1,33	u _A = 0,050	U = 0,10
	F _p = 8,58 ± 0,10				
F = (11,61 ± 0,42) N					
Řezná rychlost		Posuv	Poloměr špičky	Počet zpracovaných hodnot	
250 m·min ⁻¹		0,03 mm	3 mm	1485	
F _f [N]	Σ = -1030,63	F̄ = -0,69	s(F) = 0,31	u _A = 0,011	U = 0,02
	F _f = - 0,69 ± 0,02				
F _c [N]	Σ = 8477,08	F̄ = 5,70	s(F) = 3,64	u _A = 0,137	U = 0,27
	F _c = 5,70 ± 0,27				
F _p [N]	Σ = 9828,74	F̄ = 6,61	s(F) = 1,10	u _A = 0,041	U = 0,08
	F _p = 6,61 ± 0,08				
F = (8,76 ± 0,38) N					
Řezná rychlost		Posuv	Poloměr špičky	Počet zpracovaných hodnot	
250 m·min ⁻¹		0,09 mm	3 mm	476	
F _f [N]	Σ = -141,41	F̄ = -0,29	s(F) = 0,22	u _A = 0,008	U = 0,02
	F _f = -0,29 ± 0,02				
F _c [N]	Σ = 2527,79	F̄ = 5,31	s(F) = 3,33	u _A = 0,125	U = 0,25
	F _c = 5,31 ± 0,25				
F _p [N]	Σ = 2148,48	F̄ = 4,51	s(F) = 0,76	u _A = 0,028	U = 0,06
	F _p = 4,51 ± 0,06				
F = (6,97 ± 0,32) N					

Tab. 4.26 Statistické zpracování hodnot silového zatížení pro VBD RCMT1002M0-F1

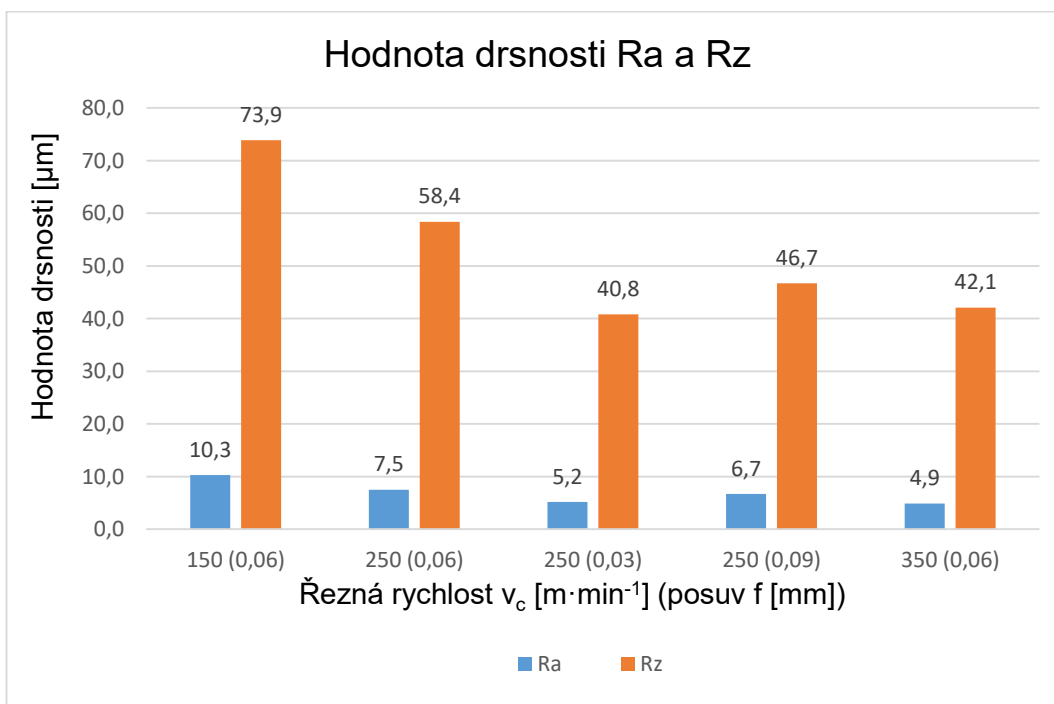
Typ VBD		RCMT1002M0-F1		Hloubka třísky		0,2 mm	
Řezná rychlost		Posuv		Poloměr špičky		Počet zpracovaných hodnot	
250 m·min ⁻¹		0,06 mm		5 mm		651	
F _f [N]	Σ = 1101,21	F̄ = 1,69	s(F) = 0,48		u _A = 0,018	U = 0,04	
	F _f = (1,69 ± 0,04) N						
F _c [N]	Σ = 4692,74	F̄ = 7,20	s(F) = 1,51		u _A = 0,057	U = 0,11	
	F _c = (7,20 ± 0,11) N						
F _p [N]	Σ = 4159,59	F̄ = 6,38	s(F) = 0,46		u _A = 0,017	U = 0,04	
	F _p = (6,38 ± 0,04) N						
F = (9,78 ± 0,18) N							
Řezná rychlost		Posuv		Poloměr špičky		Počet zpracovaných hodnot	
150 m·min ⁻¹		0,06 mm		5mm		1251	
F _f [N]	Σ = 1550,27	F̄ = 1,23	s(F) = 0,39		u _A = 0,015	U = 0,03	
	F _f = 1,23 ± 0,03						
F _c [N]	Σ = 8544,55	F̄ = 6,83	s(F) = 1,41		u _A = 0,053	U = 0,11	
	F _c = 6,83 ± 0,11						

Řezná rychlost		Posuv	Poloměr špičky	Počet zpracovaných hodnot	
150 m·min ⁻¹		0,06 mm	5mm	1251	
F _p [N]	Σ = 6528,53	F̄ = 5,21	s(F) = 0,46	u _A = 0,017	U = 0,04
	F _p = 5,21 ± 0,04				
F = (8,68 ± 0,17) N					
Řezná rychlost		Posuv	Poloměr špičky	Počet zpracovaných hodnot	
350 m·min ⁻¹		0,06 mm	5 mm	440	
F _f [N]	Σ = -188,99	F̄ = -0,42	s(F) = 0,77	u _A = 0,029	U = 0,06
	F _f = -0,42 ± 0,06				
F _c [N]	Σ = 3102,89	F̄ = 7,05	s(F) = 1,30	u _A = 0,049	U = 0,09
	F _c = 7,05 ± 0,09				
F _p [N]	Σ = 4338,87	F̄ = 9,86	s(F) = 0,74	u _A = 0,028	U = 0,05
	F _p = 9,86 ± 0,05				
F = (12,13 ± 0,21) N					
Řezná rychlost		Posuv	Poloměr špičky	Počet zpracovaných hodnot	
250 m·min ⁻¹		0,03 mm	3 mm	1451	
F _f [N]	Σ = 2292,43	F̄ = 1,57	s(F) = 0,43	u _A = 0,016	U = 0,03
	F _f = 1,57 ± 0,03				
F _c [N]	Σ = 9875,16	F̄ = 6,81	s(F) = 1,49	u _A = 0,056	U = 0,11
	F _c = 6,81 ± 0,11				
F _p [N]	Σ = 10689,44	F̄ = 7,36	s(F) = 0,69	u _A = 0,026	U = 0,05
	F _p = 7,36 ± 0,05				
F = (10,15 ± 0,19) N					
Řezná rychlost		Posuv	Poloměr špičky	Počet zpracovaných hodnot	
250 m·min ⁻¹		0,09 mm	5 mm	471	
F _f [N]	Σ = 304,21	F̄ = 0,64	s(F) = 0,45	u _A = 0,017	U = 0,03
	F _f = 0,64 ± 0,03				
F _c [N]	Σ = 3229,74	F̄ = 6,85	s(F) = 1,39	u _A = 0,052	U = 0,11
	F _c = 6,85 ± 0,11				
F _p [N]	Σ = 2774,96	F̄ = 5,89	s(F) = 0,39	u _A = 0,015	U = 0,03
	F _p = 5,89 ± 0,03				
F = (9,06 ± 0,17) N					

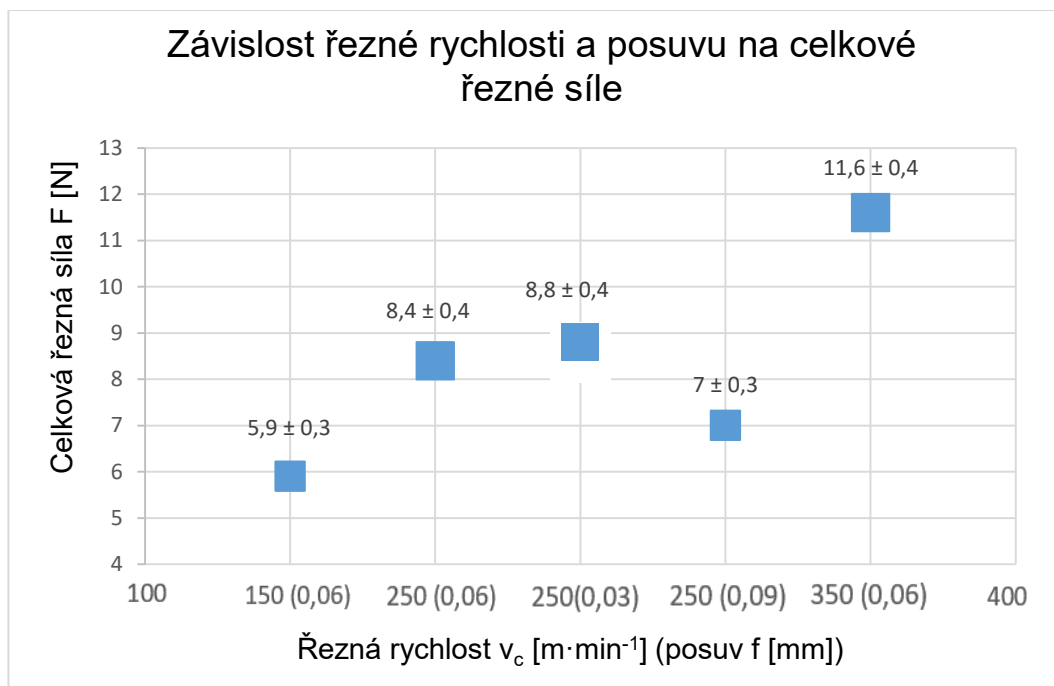
V grafech 4.1 až 4.6 jsou zobrazeny výsledné řezné síly, které probíhaly v průběhu procesu řezání žárového nástřiku, v závislosti na řezné síle a posuvu. Dále jsou v grafech zobrazeny parametry drsnosti žárového nástřiku R_a a R_z řezné rychlosti a posuvu. Dva grafy odpovídají jedné vyměnitelné břitové destičce.



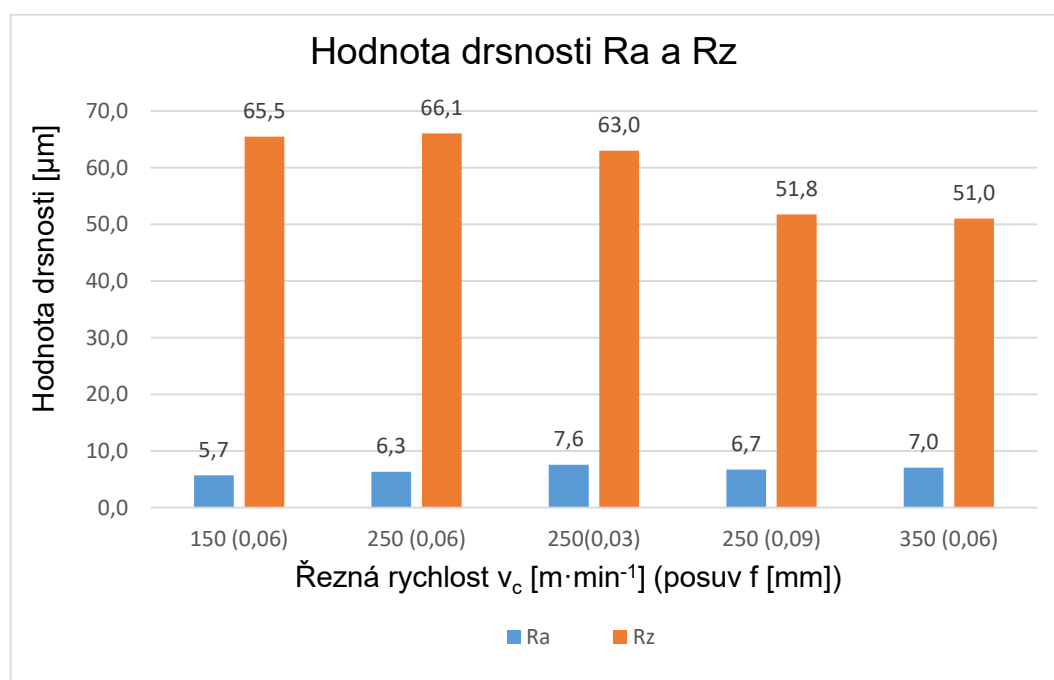
Graf 4.1 Závislost řezné rychlosti a posuvu na celkové řezné síle pro VBD DCGT11T304F-AL



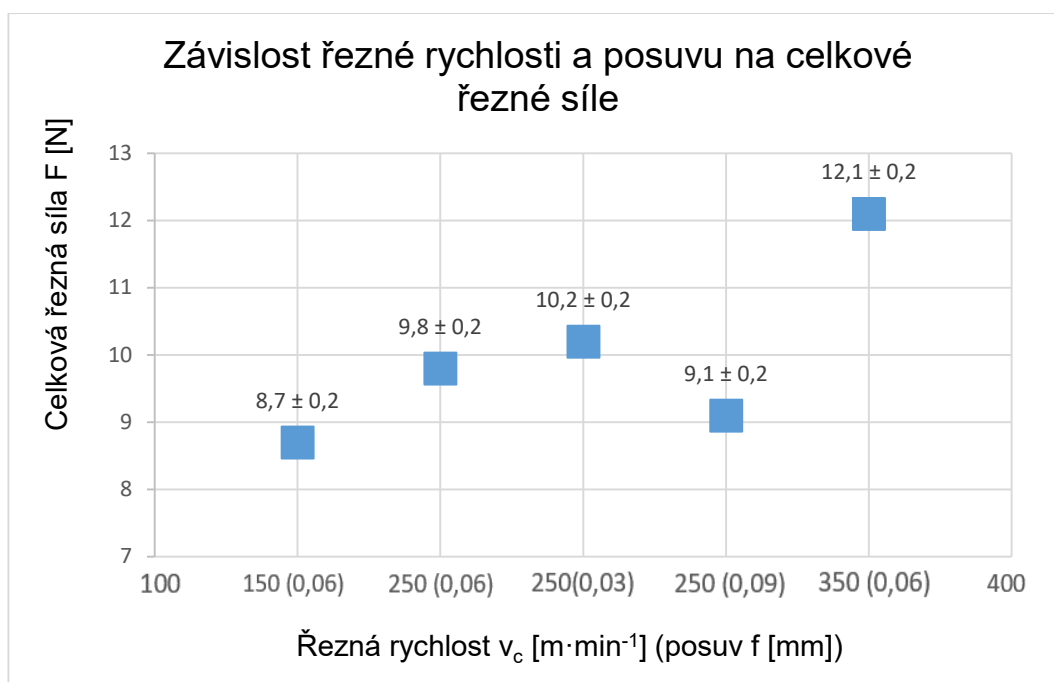
Graf 4.2 Hodnota drsnosti Ra a Rz v závislosti na řezné rychlosti a posuvu pro VBD DCGT11T304F-AL



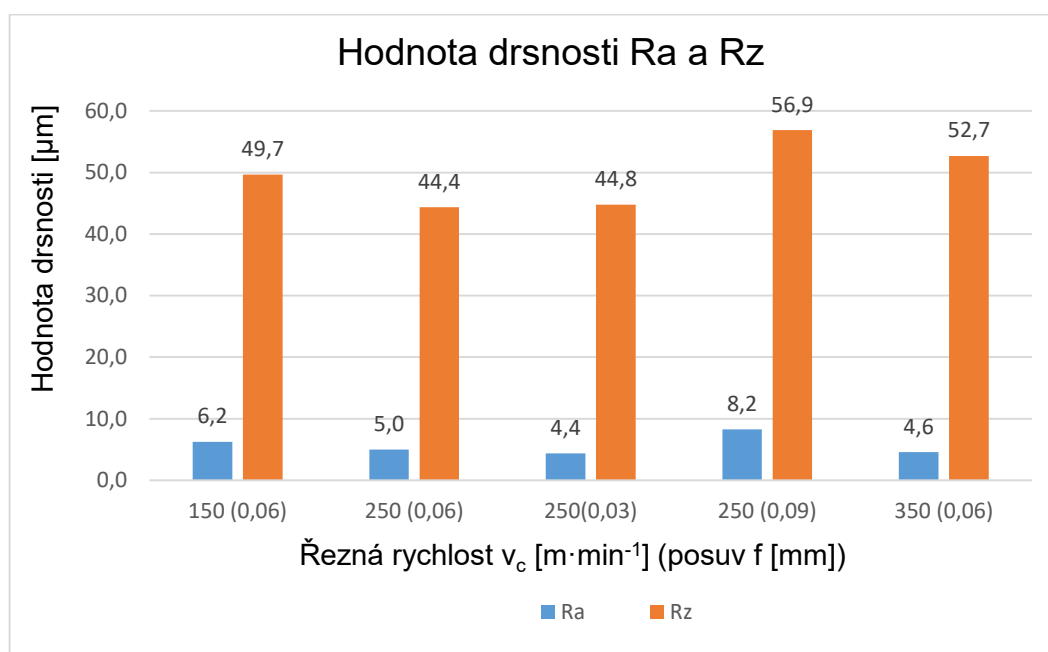
Graf 4.3 Závislost řezné rychlosti a posuvu na celkové řezné síle pro VBD
RCMT0602M0-F1



Graf 4.4 Hodnota drsnosti Ra a Rz v závislosti na řezné rychlosti a posuvu pro VBD
RCMT0602M0-F1



Graf 4.5 Závislost řezné rychlosti a posuvu na celkové řezné síle pro VBD
RCMT1002M0-F1



Graf 4.6 Hodnota drsnosti Ra a Rz v závislosti na řezné rychlosti a posuvu pro VBD
RCMT1002M0-F1

Ze všech grafů je zřejmé, že výsledné řezné síly během obrábění nejsou vysoké. Je to díky vysoce poréznímu povlaku, který je vyvinut tak, aby měl co nejmenší řezné síly – což se testováním potvrdilo. Z grafů je patrné, že řezné síly rostly s přibývajícím řeznou rychlostí. Z grafu 4.1, který odpovídá VBD DCGT11T304F-AL, je patrné, že nejnižší řezná síla je při nejnižším posuvu na rozdíl od VBD kruhovitého tvaru (graf 4.3, 4.5), kde nejnižší řezná síla

je u nejvyšší řezné rychlosti. Graf 4.2 ukazuje, že nejvyšší hodnota drsnosti nástřiku vzniká při nejmenší řezné rychlosti a středním parametru posuvu. S rostoucí řeznou rychlostí se hodnota drsnosti zmenšuje. Při porovnání hodnoty drsnosti nástřiku, který byl obráběn $v_c=250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a odlišným posuvem, byla nejvyšší hodnota drsnosti při posuvu $f=0,03 \text{ mm}$ a nejvyšší u $f=0,09 \text{ mm}$.

U VBD typu RCMT0602M0-F1 se nejvyšší celková řezná síla vyskytuje při nejvyšší řezné rychlosti a střední hodnotě posuvu $f=0,06 \text{ mm}$. Nejvyšší hodnota drsnosti R_z dosahuje při řezné rychlosti $v_c=250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuvu $f=0,06 \text{ mm}$ a R_a při řezné rychlosti $v_c=250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuvu $f=0,03 \text{ mm}$. Nejvyšší hodnota drsnosti R_a u této VBD je při řezné rychlosti $v_c=150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuvu $f=0,06 \text{ mm}$ a R_z při řezné rychlosti $v_c=350 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuvu $f=0,06 \text{ mm}$.

Pro poslední VBD typu RCMT1002M0-F1 platí, že nejvyšší řezná síla je při nejvyšší řezné rychlosti $v_c=150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuvu $f=0,06 \text{ mm}$. Oproti předchozí VBD RCMT0602M0-F1 se celkově hodnoty drsnosti snížily. Nejvyšší hodnoty drsnosti R_a a R_z se vyskytují při řezné rychlosti $v_c=250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuvu $f=0,09 \text{ mm}$. Nejvyšší hodnota drsnosti R_a dosahuje při řezné rychlosti $v_c=250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuvu $f=0,03 \text{ mm}$ a R_z při řezné rychlosti $v_c=250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuvu $f=0,06 \text{ mm}$.

4.7 Měření tvrdosti nástřiku po obrobení

Měření tvrdosti probíhalo shodně jako při měření tvrdosti nástřiku před obrobením, jak je popsáno v kapitole 4.5.

Tab. 4.24 Naměřené hodnoty tvrdosti HR15Y

Pořadí	1. měření HR15Y	2. měření HR15Y	3. měření HR15Y	4. měření HR15Y	5. měření HR15Y	Průměrná hodnota HR15Y
1. vzorek	77,6	78,2	78,6	69	74,6	75,6
2. vzorek	78,9	79,5	77,8	79,6	78,2	78,8
3. vzorek	77,0	73,9	77,4	76,7	72,0	75,4
4. vzorek	74,4	63,0	62,0	66,7	67,6	66,74
5. vzorek	75,2	64,5	68,2	73,2	67,2	69,66
6. vzorek	75,9	72,6	72,4	73,4	74,4	73,74
7. vzorek	62,1	58,8	57,7	76,1	70,1	64,96
8. vzorek	69,3	76,2	74,3	74,1	72,9	73,36
9. vzorek	70,9	74,5	71,1	70,5	74,5	72,3
10. vzorek	75,1	75,3	74,1	74,8	73,7	74,6
11. vzorek	62,0	60,5	65,5	68,0	64,5	64,1
12. vzorek	78,5	77,5	77,0	76,7	71,6	76,26
13. vzorek	73,8	69,0	70,0	62,5	71,0	69,26
14. vzorek	74,9	69,1	73,4	71,9	68,2	71,5
15. vzorek	68,7	76,9	79,7	78,0	75,7	75,8
16. vzorek	79,2	77,6	78,3	78,4	75,6	77,82
17. vzorek	76,8	79,4	78,4	78,4	77,3	78,06
18. vzorek	75,9	75,5	70,7	73,4	75,2	74,14
19. vzorek	77,2	74,8	74,4	74,2	76,4	75,4
20. vzorek	71,0	73,2	68,4	74,0	71,7	71,66
21. vzorek	78,9	77,5	75,5	68,5	75,3	75,14
22. vzorek	79,1	73,4	74,7	78,2	72,7	75,62
23. vzorek	78,2	75,8	77,2	76,7	78,9	77,36
24. vzorek	73,4	73,4	74,8	73,4	71,4	73,28
25. vzorek	76,8	76,9	75,5	76,9	80,5	77,32
26. vzorek	73,6	73,2	71,5	75,1	75,8	73,84
27. vzorek	77,1	78,3	77,0	81,4	78,2	78,4
28. vzorek	73,6	77,0	78,7	72,1	78	75,88
29. vzorek	74,1	78,7	78,8	77,3	77,3	77,24
30. vzorek	78,7	78,8	78,0	71,3	77,1	76,78

4.8 Vyhodnocení zpevnění povrchové vrstvy

Tab. 4.25 Porovnání hodnot tvrdosti HR15Y pro DCGT11T304F-AL kosočtvercového tvaru

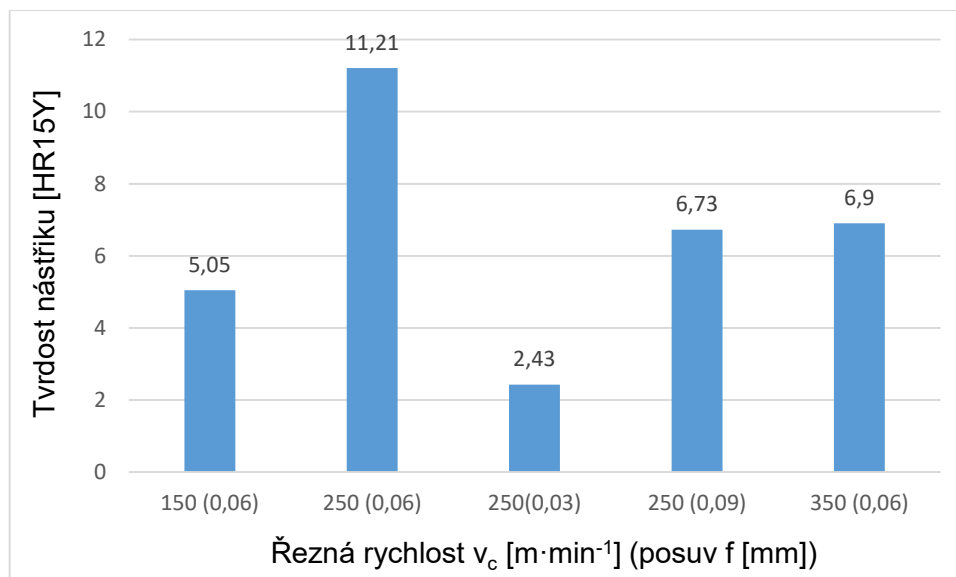
Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	DCGT11T304F-AL	0,4 mm
Pořadí vzorku	HR15Y před obrobením	HR15Y po obrobení	Rozdíl HR15Y	Průměrná HR15Y
1.	61,14	75,6	11,46	11,21
2.	67,84	78,8	10,96	
Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
150 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	DCGT11T304F-AL	0,4 mm
Pořadí vzorku	HR15Y před obrobením	HR15Y po obrobení	Rozdíl HR15Y	Průměrná HR15Y
3.	67,54	75,40	7,86	5,05
4.	64,50	66,74	2,24	
Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
350 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	DCGT11T304F-AL	0,4 mm
Pořadí vzorku	HR15Y před obrobením	HR15Y po obrobení	Rozdíl HR15Y	Průměrná HR15Y
5.	64,18	69,66	5,48	6,9
6.	65,42	73,74	8,32	
Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,03 mm	0,2 mm	DCGT11T304F-AL	0,4 mm
Pořadí vzorku	HR15Y před obrobením	HR15Y po obrobení	Rozdíl HR15Y	Průměrná HR15Y
7.	64,48	64,96	0,48	2,43
8.	68,98	73,36	4,38	
Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,09 mm	0,2 mm	DCGT11T304F-AL	0,4 mm
Pořadí vzorku	HR15Y před obrobením	HR15Y po obrobení	Rozdíl HR15Y	Průměrná HR15Y
9.	63,00	72,30	9,30	6,73
10.	70,44	74,60	4,16	
Celková průměrná hodnota tvrdosti HR15Y				6,464

Tab. 4.26 Porovnání hodnot tvrdosti HR15Y pro RCMT0602M0-F1 kruhotého tvaru s D=6 mm

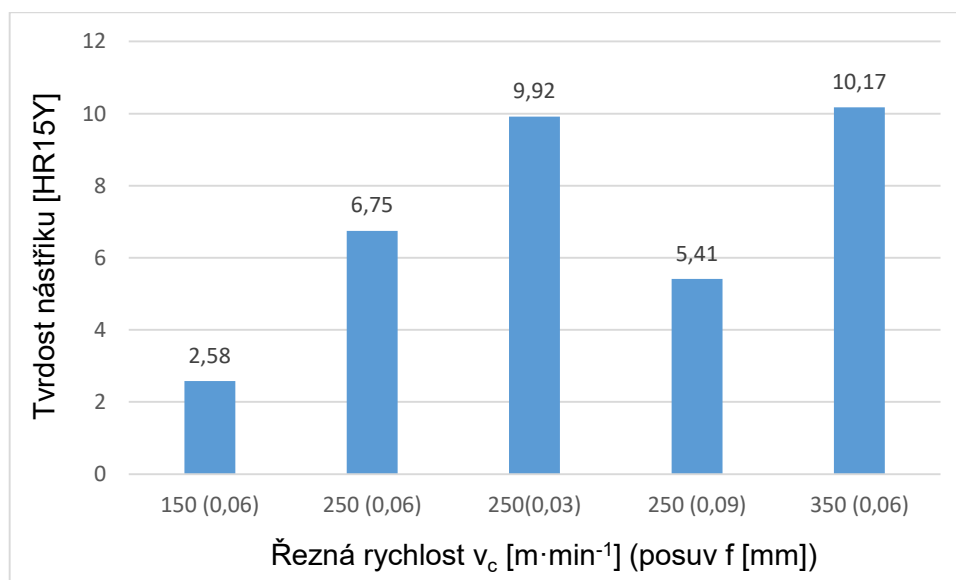
Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	RCMT0602M0-F1	3 mm
Pořadí vzorku	HR15Y před obrobením	HR15Y po obrobení	Rozdíl HR15Y	Průměrná HR15Y
11.	62,04	64,1	2,04	6,75
12.	64,82	76,26	11,44	
Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
150 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	RCMT0602M0-F1	3 mm
Pořadí vzorku	HR15Y před obrobením	HR15Y po obrobení	Rozdíl HR15Y	Průměrná HR15Y
13.	64,86	69,26	4,4	2,58
14.	70,74	71,5	0,76	
Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
350 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	RCMT0602M0-F1	3 mm
Pořadí vzorku	HR15Y před obrobením	HR15Y po obrobení	Rozdíl HR15Y	Průměrná HR15Y
15.	63,82	75,80	11,98	10,17
16.	69,46	77,82	8,36	
Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,03 mm	0,2 mm	RCMT0602M0-F1	3 mm
Pořadí vzorku	HR15Y před obrobením	HR15Y po obrobení	Rozdíl HR15Y	Průměrná HR15Y
17.	70,18	78,06	7,88	9,92
18.	62,18	74,14	11,96	
Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,09 mm	0,2 mm	RCMT0602M0-F1	3 mm
Pořadí vzorku	HR15Y před obrobením	HR15Y po obrobení	Rozdíl HR15Y	Průměrná HR15Y
19.	67,78	75,40	7,62	5,41
20.	68,46	71,66	3,20	
Celková průměrná hodnota tvrdosti HR15Y				6,966

Tab. 4.27 Porovnání hodnot tvrdosti HR15Y pro RCMT1002M0-F1 kruhového tvaru s D=10 mm

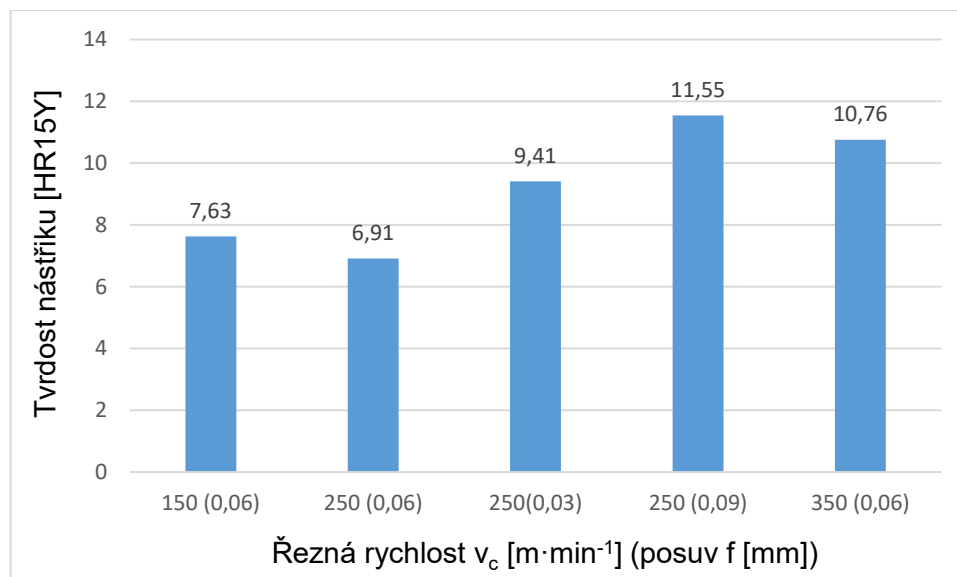
Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	RCMT1002M0-F1	5 mm
Pořadí vzorku	HR15Y před obrobením	HR15Y po obrobení	Rozdíl HR15Y	Průměrná HR15Y
21.	70,66	75,14	4,48	6,91
22.	66,28	75,62	9,34	
Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	RCMT1002M0-F1	5 mm
Pořadí vzorku	HR15Y před obrobením	HR15Y po obrobení	Rozdíl HR15Y	Průměrná HR15Y
23.	70,06	77,36	7,30	7,63
24.	65,32	73,28	7,96	
Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,06 mm	0,2 mm	RCMT1002M0-F1	5 mm
Pořadí vzorku	HR15Y před obrobením	HR15Y po obrobení	Rozdíl HR15Y	Průměrná HR15Y
25.	69,28	77,32	8,04	10,76
26.	60,36	73,84	13,48	
Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,03 mm	0,2 mm	RCMT1002M0-F1	5 mm
Pořadí vzorku	HR15Y před obrobením	HR15Y po obrobení	Rozdíl HR15Y	Průměrná HR15Y
27.	64,48	78,40	13,92	9,41
28.	70,98	75,88	4,90	
Řezná rychlost	Posuv	Hloubka třísky	Typ VBD	Poloměr špičky
250 m·min ⁻¹	0,09 mm	0,2 mm	RCMT1002M0-F1	5 mm
Pořadí vzorku	HR15Y před obrobením	HR15Y po obrobení	Rozdíl HR15Y	Průměrná HR15Y
29.	63,90	77,24	13,34	11,55
30.	67,02	76,78	9,76	
Celková průměrná hodnota tvrdosti HR15Y				9,252



Graf 4.4 Závislost řezné rychlosti a posuvu na tvrdosti nástřiku pro VBD DCGT11T304F-AL



Graf 4.5 Závislost řezné rychlosti a posuvu na tvrdosti nástřiku pro VBD RCMT0602M0-F1



Graf 4.6 Závislost řečné rychlosti a posuvu na tvrdosti nástřiku pro VBD RCMT1002M0-F1

Hodnoty tvrdosti jsou jednoznačně vyšší oproti tvrdostím změřených před obrobením nástřiku, avšak je nutné vzít na vědomí, že se tvrdost nástřiku zvětšuje se zmenšující tloušťkou žárového nástřiku. Tvrdost nástřiku byla měřena na vzorku s průměrem cca 30,7 mm. Následně byl rozměr osoustružen na průměr 30,3 mm kvůli zarovnání vysokých nerovností nástřiku a soustružen na finální průměr 29,9 mm. Rozdíl byl tedy mezi jednotlivými měřeními 0,4 mm na stěně vzoru. Tento rozdíl tloušťek může zapříčít, že druhé měření tvrdosti bylo ovlivněno základním materiálem.

Závěr

Tato práce se zabývala obráběním žárově stříkaných ohrusitelných ucpávek - abradable nástřiků. Cílem práce bylo zjistit vliv obráběcích parametrů na povrchové zpevnění žárového nástřiku. Teoretická část práce byla zaměřena na teorii žárových nástřiků – princip, typy, metody a porovnání metod žárových nástřiků, zdroje tepelné energie a zařízení pro žárový nástřik. Poté byla řešena problematika teorie obrábění – silové vztahy procesu řezání, fyzikální základy procesu řezání a geometrie břitu. V teoretické části byly dále řešeny metody měření tvrdosti a drsnosti povrchu. V experimentální části práce byly popsány použité žárově stříkané povlaky, použité zařízení, přípravky a vzorky, které byly pro experiment použity. Dále byly popsány použité řezné nástroje, volba řezných podmínek, měření tvrdosti nástřiku před obrobením a obrábění nástřiku spolu s měřením řezných sil a statistickým zpracováním naměřených hodnot. Poté byla změřena tvrdost nástřiku po obrobení a vyhodnocení zpevnění povrchové vrstvy.

Pro experiment byly vyrobeny testovací válečky, na které byl nanesen žárový nástřik a testovací přípravek pro měření tvrdosti a drsnosti nástřiku. Obrábění a měření drsnosti probíhalo v laboratořích VŠB-TU v Ostravě a měření tvrdosti proběhlo v metalografické laboratoři přímo ve společnosti Honeywell. Na testovací válečky byla nejprve nanesena mezivrstva Metco 480NS a následně abradable povlak Metco 2042 plazmový nástřikem. Pro obrábění byly využity dva typy kruhových vyměnitelných břitových destiček s různým poloměrem a jeden typ vyměnitelné břitové destičky kosočtvercového tvaru s ostrou geometrií břitu. Soustružení žárového nástřiku probíhalo za různých řezných parametrů. Vycházelo se ze standardních parametrů, které jsou využívány ve společnosti Honeywell, následně byla řezná rychlost a posuvová rychlost navýšena a poté snížena. Pro měření sil byl při soustružení použit tříslůžkový dynamometr Kistler a počítačový software DynoWare.

Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny v softwaru DynoWare do grafů, ve kterých byly filtrovány průběhy složek řezných sil. Z vyfiltrovaných dat byl vybrán pouze interval, kde byl plynulý ustálený průběh. Hodnoty byly dále statisticky zpracovány a byly vypočteny výsledné řezné síly pro daný řezný parametr a vyměnitelnou břitovou destičku. Vyměnitelná břitová destičky s nejmenším poloměrem zaoblení řezné hrany měla nejnižší výslednou řeznou sílu a se zvětšujícím poloměrem zaoblení se řezné síly zvyšovaly. Výsledné řezné síly, až na malé odchylky, odpovídaly teorii obrábění. Odchylky složek řezných sil zapříčiňuje vysoce porézní obráběný povlak.

Měření drsnosti nástřiku bylo provedeno bezdotykovou optickou metodou na zařízení Infinite Focus G5. Nasnímaný povrch žárového nástřiku byl pomocí softwaru vygenerován a následně byly vyhodnoceny jednotlivé složky drsnosti nástřiku. Hodnota drsnosti nástřiku

R_z byla nejvyšší u vyměnitelné břitové destičky DCGT11T304F-AL a se zvětšujícím poloměrem zaoblení špičky se nejvyšší hodnota R_z snižovala. Průměrná nejnižší hodnota R_z se vyskytovala u vyměnitelné břitové destičky RCMT1002M0-F1.

Hlavním a posledním měřením bylo měření tvrdosti nástřiku a zjištění, zda v povrchu vzniká zpevnění, či nikoli. Před obrobením a po obrobení byla změřena tvrdost nástřiku na zařízení LECO typu LR-300TDL. Každý testovací vzorek byl pětikrát změřen a vypočtena průměrná tvrdost jednoho vzorku. Všechny měřené vzorky měly vyšší tvrdost po obrobení, což ukazuje výskyt povrchového zpevnění. Nejvyšší průměrná zvýšená tvrdost byla u VBD kruhového tvaru s označením RCMT1002M0-F1. Vyměnitelná břitová destička RCMT0602M0-F1 byla o 0,5 HR15Y tvrdší než destička DCGT11T304F-AL. Společnosti Honeywell bylo doporučeno nepoužívat pro obrábění abaradble nástřiků destičku kruhové tvaru s označením RCMT0602M0-F1, u které byla nejnižší zvýšená tvrdost naměřena 6,91 HR15Y. Doporučené řezné podmínky pro společnost Honeywell jsou $v_c=250 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f=0,03 \text{ mm}$ s použitím DCGT11T304F-AL a $v_c=150 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f=0,06 \text{ mm}$ s použitím RCMT0602M0-F1, které se pohybují v rozmezí $2,5\pm0,08 \text{ HR15Y}$. Tato tolerance nebude výrazně ovlivňovat výsledek u měření tvrdosti, jelikož tolerance pro hodnocení tvrdosti nástřiku ve společnosti Honeywell je $\pm 10 \text{ HR15Y}$.

Pro lepší statistický výsledek by bylo vhodné provedení testů na více testovacích válečcích pro jeden řezný parametr s danou VBD. Dalším případným pokračováním v této oblasti by bylo zjistit to, do jaké míry ovlivňuje základní materiál tvrdost nástřiku při zmenšující se tloušťce žárového nástřiku.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Tomáši Zlámalovi, Ph.D. za jeho odbornou pomoc a vstřícné jednání při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Pavlovi Krajčovičovi za poskytnutí odborných podkladů a cenných rad.

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektů SP2017/147 Specifický výzkum v oblasti výrobních technologií a SP2017/149 Výzkum produktivních a ekologicky úsporných výrobních technologií s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a navazujících magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.

Literatura

- [1] Houdková Šimůnková, Šárka. Enžl, Radek. Bláhová, Olga. *Žárové nástřiky: Moderní technologie povrchových úprav* [online]. 2003 [cit. 2017-01-15]. Dostupné z: <http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/14.html>
- [2] Plasmametal.cz. *Žárové stříkání* [online]. 2016 [cit.2017-01-15]. Dostupné z: <http://www.plasmametal.cz/pouzite-technologie#zakladni-metody>
- [3] TSTcoating.com. *Thermal barrier* [online]. 2016 [cit.2017-01-15]. Dostupné z: http://www.tstcoatings.com/thermal_barrier.html
- [4] TSTcoating.com. *Wear resistant coatings* [online]. [cit.2017-01-18]. Dostupné z: http://www.tstcoatings.com/wear_resistant_coatings.html
- [5] Mmspektrum.com. *Technologie žárového nástřiku v leteckém průmyslu*. [online]. 2001 [cit. 2017-01-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-zaroveho-nastriku-v-leteckem-prumyslu.html>
- [6] Legrand, M., Batailly, A., Pierre, C.. *Numerical Investigation of Abradable Coating Removal in Aircraft Engines Through Plastic Constitutive Law*. [online]. [cit.2017-01-25]. Dostupné z: <http://computationalnonlinear.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1396875>
- [7] Gordonengland.co.uk. *Plasma Spray Process* [online]. [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: <http://www.gordonengland.co.uk/ps.htm>
- [8] Pokorný, Petr. Brožek, Vlastimil. *Úvod do technologie povrchové úpravy plazmovým nástřikem* [online]. [cit.2017-01-25]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62012/uvod-do-technologie-povrchove-upravy-plazmovym-nastrikem-1-cast.html>
- [9] Koudelka, Tomáš. *Aplikace žárového nástřiku na spalovací motor automobilu: Diplomová práce*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2009. s. 58. Vedoucí práce doc. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.
- [10] Sciencereviews2000.co.uk. *D-Gun Spraying Enhances High Temp Corrosion* [online]. 2011 [cit.2017-01-30]. Dostupné z: http://www.sciencereviews2000.co.uk/blog_v2/view/d-gun-spraying-enhances-high-temp-corrosion/394#.V_vbROCLTIU

- [11] Servisarmatur.cz. *Vysokorychlostní nástřik HVOF (High Velocity Oxy-Fuel)* [online]. 2012 [cit.2017-01-30]. Dostupné z: <http://www.servisarmatur.cz/index.php?page=high-velocity-spray>
- [12] Čelko, Ladislav. *Transfer, výzkum a vývoj pro letecký průmysl*. Praha, 2015. ISSN 1801 – 9315
- [13] Ellisonsurfacetech.com. *Dense Vertically-Cracked Thermal Barrier Coating*. [online]. [cit.2017-01-30]. Dostupné z: <http://www.ellisonsurfacetech.com/pages/dvctbc.html>
- [14] HFW Industries, Inc. *HVOF Thermal spraying with tungsten carbide* [online]. 2014 [cit.2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.hfwindustries.com/blog/2014/01/hvof-thermal-spraying-with-tungsten-carbide-5/>
- [15] Ghasripoor, Farshad. Schmid, Richard. Dorfman, Mitchell. *Abradable Coatings Increase Gas Turbine Engine Efficiency* [online]. 2001 [cit.2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=739>
- [16] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
- [17] PŘÍKRYL, Zdeněk a Rosa MUSÍLKOVÁ. *Teorie obrábění*. 3. opr. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982.
- [18] Pagáč, Marek. *Konstruktor měření sil Iscar dynamometr Kistler* [online]. 2015 [cit.2017-02-15]. Dostupné z: <http://www.konstrukter.cz/2015/05/25/zive-ukazky-obrabeni-sledovaly-prubeh-reznych-sil/3-konstrukter-mereni-sil-iscar-dynamometr-kistler/>
- [19] Mádl, Jan. *Teorie obrábění*. České vysoké učení v Praze. 1990
- [20] ČSN EN ISO 14924. *Žárové stříkání: Dodatečné úpravy a konečná úprava žárově stříkaných povlaků*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [21] Merenitvrlosti.cz. *Tvrlost* [online]. 2011 [cit.2017-02-20]. Dostupné z: <http://www.merenitvrlosti.cz/tvrlost.html>
- [22] Hanyko-praha.cz. *Zkouška tvrdosti podle Brinella* [online]. 2016 [cit.2017-02-20]. Dostupné z: <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrlost-a-jak-se-meri/zkouska-tvrlosti-podle-brinella/>
- [23] Hanyko-praha.cz. *Zkouška tvrdosti podle Vickerse* [online]. 2016 [cit.2017-02-22]. Dostupné z: <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrlost-a-jak-se-meri/zkouska-tvrlosti-podle-vickerse/>

- [24] Hanyko-praha.cz. *Zkouška tvrdosti podle Rockwella* [online]. 2016 [cit.2017-02-28]. Dostupné z: <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrdost-a-jak-se-meri/zkouska-tvrdosti-podle-rockwella/>
- [25] Tauricon.sk. *Přístroje na zkoušky tvrdosti podle Rockwella* [online]. [cit.2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.tauricon.sk/prospekty-mitutoyo-pdf/04-prc1364.pdf>
- [26] Gifford, Douglas. Pollard, Larry. Wuest, Gregory. Fletcher, Randy. *Thermal Spray Booth Design Guidelines* [online]. [cit.2017-03-15]. Dostupné z: <http://www.asminternational.org/content/TSS/pics/safety/safety5.pdf>
- [27] Fst.nl. *Turnkey thermal spray coating systems and projects*. [online]. [cit.2017-03-15]. Dostupné z: <http://www.fst.nl/systems/aps-plasma-thermal-spray-coating-system/turnkey-plasma-thermal-spray-coating-system/>
- [28] GAZDA, J.: Teorie obrábění – Řezné síly při obrábění. Vysoká škola strojní a textilní v Liberci 1993.
- [29] Kistler.com. *Force Sensors from Kistler* [online]. [cit.2017-03-15]. Dostupné z: https://www.kistler.com/gr/en/products/components/force-sensors/#1_component_force_sensor_fz_up_to_7_5_k_n_1_68_klbf_9001_a
- [30] Mbcaltibr.cz. *Měření drsnosti* [online]. [cit.2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.mbcaltibr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [31] Oerlikon.com. *Pure Metal, Alloy, Clad Composite, and Blended Powders for Thermal Spray* [online]. 2017 [cit.2017-03-20]. Dostupné z: <https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-materials/coating-materials-thermal-spray/metals-alloys-composites-blends/>
- [32] Katalog a technický průvodce 2015. *Secotools*. [online] Dostupné z: <https://www.secotools.com/cs/CZ-Czech-Republic/Home/>
- [33] TICHÁ, Š.: *Strojírenská metrologie*. Ostrava, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006. s. 112. ISBN 80-248-0671-1.